

工程科技與智慧化應用

《人物專訪》

台電以智慧工程，重構電力設施的長期基礎
專訪台灣電力公司輸供電事業部南區施工處張文旗處長

《工程論著》

整合資料庫與大型語言模型進行物價調整之應用

《專題報導》

預鑄工法之工程效益探討—以貴舍 RS 變電所為例
國道施工交維實務解析—以北外環交流道工程為例
建構 AIoT 實證場域—以亞灣智慧公宅新建統包工程為例
過港隧道高壓細水霧整合感測交控之智慧消防系統
當城市邁向淨零—從輕軌看見低碳生活藍圖
污水處理廠 AI 智慧化管理與維護的永續發展
AI 驅動營建轉型—以樂善安居社宅數位雙生平台為例
T3 主航廈巨柱與屋頂鋼結構施工解析

《特稿》

捷運車輛智慧化維運系統之研究

January/2026

149

工程科技與智慧化應用

中華
技術
CECI

ENGINEERING
TECHNOLOGY



中華技術 CECI ENGINEERING TECHNOLOGY

No.149
January/2026

目錄

Contents



訂閱
中華技術電子書



中華顧問
中華技術電子書平台



台灣世曦
中華技術電子書平台

本刊文章為作者提供，
內容正確性及法律責任
概由作者自行負責

匠心獨運

- 004 智慧工程新紀元
跨域整合與技術升級打造韌性公共建設

人物專訪

- 008 台電以智慧工程，重構電力設施的長期基礎
專訪台灣電力公司輸供電事業部南區施工處張文旗處長

工程論著

- 016 整合資料庫與大型語言模型進行物價調整之應用

發行人 蔡宗倫
發行所 財團法人中華顧問工程司
地址 台北市辛亥路二段 185 號 28 樓
電話 (02)8732-5567
網址 <http://www.ceci.org.tw>
I S S N 1818-4464

編審工作小組
總召集人 鄭運鵬
副總召集人 廖學瑞

149 期召集人 莊明哲
149 期審查委員 張曜洲、蔡同宏、許朝榮、
鄧建華、黃寶翰、黃金田
總編輯 張曜洲
副總編輯 林建志
企劃 台灣世曦工程顧問股份有限公司
設計編輯 天下雜誌股份有限公司
地址 台北市內湖區陽光街 323 號
電話 (02)8797-3567
網址 <http://www.ceci.com.tw>



封面故事

本期聚焦「工程科技與智慧化應用」，展示 AIoT、BIM、LLM 與數位雙生技術如何驅動公共工程轉型；透過台電預鑄變電所、桃機 T3 巨柱、亞灣公宅與社宅數位雙生平台，展現精密施工與風險監控的卓越成果；結合國道交維實務、過港隧道智慧消防與 LLM 物價調整應用，提升施工安全與管理效能；配合輕軌低碳運輸、污水廠與捷運車輛之 AI 智慧維運，引領讀者見證大型建設邁向智慧永續城市的新紀元。

專題報導

- 030 預鑄工法之工程效益探討—以貴舍 RS 變電所為例
- 042 國道施工交維實務解析—以北外環交流道工程為例
- 054 建構 AIoT 實證場域—以亞灣智慧公宅新建統包工程為例
- 070 過港隧道高壓細水霧整合感測交控之智慧消防系統
- 082 當城市邁向淨零—從輕軌看見低碳生活藍圖
- 098 污水處理廠 AI 智慧化管理與維護的永續發展
- 110 AI 驅動營建轉型—以樂善安居社宅數位雙生平台為例
- 124 T3 主航廈巨柱與屋頂鋼結構施工解析

特稿

- 150 捷運車輛智慧化維運系統之研究
-

智慧工程新紀元

跨域整合與技術升級 打造韌性公共建設

科技與智慧化應用正在全面重塑大型公共工程建設的運作模式。AI、大數據、物聯網、雲端運算與數位孿生等技術，逐步導入工程規劃、設計、施工至維運的全生命週期，使工程決策能建立在即時、可追溯的數據基礎之上。這不僅提升工程效率、精準度與施工安全，也讓結構狀況與設備風險得以及早掌握，協助工程團隊在高度複雜與不確定的環境中，穩定控管成本、工期與品質。

隨著科技深化應用，工程專業亦從單一技術執行，轉向跨領域整合與系統治理思維。工程人才除了具備扎實的專業能力，更需結合資料分析、數位工具操作與跨部門溝通協調，甚至因應公共工程的實際需求，自主研發智慧化系統，將技術轉化為支撐大型公共建設長期運作的關鍵能力。

AI 應用》從工地管理到安全監測

AI 已成為各行各業的關鍵轉型引擎，在工程領域中，則被用來因應人力資源緊繃與工地管理複雜度提升的現實需求，藉由提升施工效率與安全監控能力，成為支撐公共工程穩定推進的重要工具。

如本期專訪的台灣電力公司輸供電事業部南區施工處張文旗處長，即是智慧變電所、無人化管理、配電自動化與快速復電的執行推手之一。他指出，過去傳統戶外鐵塔式變電所，在極端氣候肆虐下顯得脆弱，近年台電逐步推動變電所「屋內化」、「地下化」，大幅降低設備受損風險。同時導入國際規範 IEC61850 監控架構，將設備資訊整合至遠端監控台，即便變電所無人值守，行控中心仍能即時掌握運轉數據並下達指令，確保電力傳輸穩定。

進一步結合先進配電管理系統 (ADMS) 與智慧電表大數據，台電能精準定位停電區域，縮短人員巡檢時間。當事故發生時，智能開關會自動隔離故障點，並嘗試轉供復電，大幅縮小停電範圍與時間，將事後搶修轉為智慧化即時應變。

然而，AI 的價值並不僅止於電力系統的無人化管理，在工程現場的施工管理與安全監測上，同樣展現高度應用潛力。在高雄前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程中，施工階段即導入 AIoT 智慧工地管理平台，將傳統人工管理轉化為可視化數據，從戰情儀表板、環境監測、電子圍籬、洗車台、人臉辨識，到地下水位與水壓監測，皆可即時掌握。

生成式 AI 也在該工程中發揮極大效益，透過結合無人機空拍圖資，AI 可自動辨識施工進度與潛在缺失，分析每日工期進度、人力數據，自動生成巡檢報告，並應用 AI 即時翻譯功能，協助與外籍移工溝通，提升團隊協作效率。

不只在陸地上，水下工程也成為 AI 的應用場域。高雄港務分公司推動過港隧道消防設備提升改善工程，在提升防災韌性的過程中，把高壓細水霧技術應用在條件嚴苛的海底沉埋管隧道，結合 AI 影像與光纖感測實現智慧化防護，可自動偵測火焰、濃煙、交通事故，還能精準定位火源位置，並提供路人以手動按鈕即時通報事故選項。

一旦確認火警，系統會鎖定火源位置，同步啟動該區、前後相鄰各一區細水霧噴頭，阻絕火勢蔓延。這種精準用水與控制特性，不僅解決沉埋管結構怕高溫與排水受限的痛點，更為國內長隧道、關鍵技術設施的消防安全升級樹立標竿。

在污水處理廠中，AI 同樣發揮關鍵作用。傳統操作常因反應遲滯導致曝氣過度、加藥過量，不只造成能源與藥劑浪費，也影響放流水質穩定性。透過導入 AIoT，污水處理廠得以從被動監測轉向資料驅動的智慧決策，實現能耗優化與精準控制。

以某科學園區污水處理廠為例，導入 AI 精準加藥系統、AI Sensor 防禦系統、AI 節能優化系統後，這些系統在不干擾現場操作的前提下，展現顯著節能減碳潛力，電力消耗、污泥產量預期減少約 10%，而藥劑使用量則可降低 15 ~ 20%，水質也變得更穩定，由於系統能提前預警故障，透過提前從事預測性維護就能減少突發性停機。

而在人潮川流不息的高雄輕軌，AI 也扮演吃重角色。由於高雄輕軌部份路段與一般車輛共用路口，且無平交道遮斷桿，路口事故風險較高，因此在重點路口與車站由 AI 即時分析路口監視器影像，判斷軌道內是否有非輕軌車輛或行人滯留，一旦偵測到碰撞風險，會連動地面警示燈閃爍，並將訊號傳給列車駕駛、行控中心，把事故風險降至最低。

車廂內，AI 演算法則會把車廂內乘車人數轉化為視覺化的擁擠度等級。乘客在月台上候車時，可透過 App 預先知道即將進站的列車哪一節車廂比較空，實現分流，提升搭乘舒適度。

在工地現場之外，AI 亦能於工程幕後運籌帷幄之效。現行公共工程契約允許依據「營建物價總指數」或更精準的「中／單分類指數」進行物價調整，但前者往往無法反映特定材料劇烈漲跌，後者則仰賴人工逐項比對繁雜的詳細價目表工項，耗時且容易產生爭議。

因此，台灣世曦工程顧問股份有限公司高雄工程處、國立高雄科技大學管理工程系攜手提出結合大型語言模型、關鍵式資料庫的自動化系統，大幅降低行政作業成本，更為公共工程提供透明、公平且具追溯性的物價調整解決方案。

5G 技術》驅動軌道智慧維運關鍵

無論是軟體管理或技術創新，國內工程人才有能力自主開發系統，反映的是對新科技的掌握度越來越高，5G 便是其一。面對捷運路網擴大，資料分散且非即時，加上歷史紀錄不夠結構化、調度決策資訊匱乏、維護模式被動，使傳統車輛維運模式已經不敷使用，正是 5G 能派上用場的時刻。

對此，國立高雄科技大學鐵道技術中心提出的「遠端資訊擷取與整合系統」，就運用 5G 低延遲特性、物聯網技術解決上述問題，將捷運維運由人工、被動，轉型為數位、主動，並提供行控中心與維修人員即時且一致的決策資訊，為未來導入 AI 機器學習預測剩餘壽命與數位孿生系統奠定基礎數據架構。

BIM 數位技術》全生命週期的精準管理

除了 5G，BIM 數位技術也是智慧工程的重要基石。透過三維模型整合設計、結構、施工、成本與維運等全生命週期資訊，BIM 能將原本分散於各階段與專業的資料集中管理，不僅提升跨專業協作效率，也有效降低設計錯誤與施工重工風險，強化工程品質、進度與成本控管。在國內公共工程規模日益擴大、工期與品質要求同步提高的情況下，BIM 所帶來的系統化管理優勢，已成為不可或缺的關鍵工具。

嘉義縣布袋鎮新建的貴舍 R/S 一次配電變電所工程，即是 BIM 落實於公共工程的代表案例。統包團隊結合預鑄工法與 BIM 數位技術，打造出台電首座大規模採用預鑄工法建構的變電所。工程全生命週期導入 BIM，不僅在預鑄構件的生產端進行鋼筋細部配置模擬與衝突檢討，建立完整的生產履歷，也在整體建築資訊模型整合進行碰撞檢討與施工模擬。

透過 BIM 雲端平台與平板裝置，監造與施工人員可即時比對模型與現場狀況，大幅提升溝通效率，進而縮短工期、降低碳排，同步強化施工品質與作業安全。

在工程風險更高、即時判斷尤為關鍵的基礎開挖階段，BIM 的應用同樣展現價值。

桃園市「樂善安居」社會住宅基地鄰近林口台地邊緣，屬回填層、紅土卵礫石層，地下水位雖深，卻容易受到強降雨影響。為此，工程團隊導入 BIM 模型、IoT 感測器，並結合 AI 與數位孿生技術，建構 V3DM 平台，實現即時監測與風險預警。

在 BIM 模型中，系統會以醒目方式呈現數位感測器模型與其監測數據，使用者能直觀掌握感測器在基地內的空間配置與地理位置關係，並根據監測管理值範圍進行顏色區分，在安全範圍內顯示為綠色，超出警戒值、行動值時分別顯示為黃色與紅色，使過往看不見的風險即時視覺化呈現。

在桃園國際機場第三航廈主航廈工程中，BIM 數位技術同樣發揮關鍵作用。航廈工程中，最具挑戰性的三樓版上巨柱與屋頂桁架均採鋼結構設計，鋼材須於韓國進行高精度加工製造後，再運抵台灣安裝。為避免累積誤差，巨柱在韓國浦項鋼鐵工廠先採橫躺式預組立，並利用 BIM 模型放樣，確認上下端口尺寸與斜線交會點無誤後，才拆解進行塗裝與海運。

施工過程中，由於航廈樓板無法直接承受大型吊車與巨型鋼構重量，且單側動線受限，團隊因而導入軌道平台系統，成功克服場地荷重限制，並搭配在地模組化策略，終於實現巨型屋頂鋼構的高效與安全組裝。

然而，智慧工程並不全然仰賴高科技，關鍵時刻，回歸工程本質的基礎技術，往往才是左右設計與決策的關鍵。

《現地鋪面鑽心》優化設計與決策法寶

導入新科技雖已成台灣公共工程建設的顯學，但仍有工程將基礎技術提升為優化設計的關鍵決策工具，如國道 1 號台南系統至永康交流道間興建的「北外環交流道」，即透過鑽心取樣，在道路或鋪面現場鑽取圓柱狀試體，以取得實際材料樣本輔助決策，使工程得以在維持國道高流量運作的前提下進行施工。

其中，Ramp 4 匝道拓寬工程原設計需進行長達 1,150 公尺的路基改善，但監造團隊透過現地鋪面鑽心取樣分析，以科學數據證明既有國道路基厚度已足夠，將施工範圍縮減至 124 公尺，大幅減少開挖破壞，直接降低在高速公路上長時間施工的風險與成本。

綜觀本期案例，台灣工程界正經歷前所未有的智慧革命。這些創新不僅是技術堆疊，更代表工程治理思維的翻轉，讓工程從被動應對轉為主動預測，從經驗法則走向數據決策，為公共工程打造更具韌性、效率與永續性的未來。

台電以智慧工程， 重構電力設施的長期基礎



專訪台灣電力公司 輸供電事業部南區施工處 張文旗處長

運用新智慧科技，對成立 80 年的台灣電力公司而言，早已不只是附加價值，而是追求永續成長的核心思維。近 20 年來，台電持續多次智慧革新，使電力工程的智慧化應用逐步成為設計與管理的關鍵。在台電輸供電事業部南區施工處處長張文旗的帶領下，南區施工處成為智慧創新的示範基地，不僅落實多項創新作法，更將可複製的成果推廣至整個台電體系，為電力工程轉型奠定基礎。

工程智慧化已成為企業經營的新顯學，各產業紛紛投入推動，作為台灣能源發展的領航者，台灣電力公司亦不例外。面對全球 2050 淨零排放目標，台灣能源正處於轉型關鍵期，未來幾年，大量分散式、間歇性再生能源併入電網，將對傳統單向、集中式的電力調度系統帶來巨大挑戰。

隨著 AI 科技時代來臨，為保障能源供應穩定，台灣電網勢必轉型為雙向、具高度彈性的智慧電網；同時，在全球極端氣候威脅下，打造更堅固、更智慧的韌性電網，亦成為台電的重要使命。

運用新智慧科技，提升電網韌性

為因應上述挑戰，近 20 年來，台電陸續改建多項基礎電力工程，積極培育新世代人才，並導入智慧科技，從電網結構、運維管理與復電效率等三大面向著手，全面提升電網的智慧性與強韌性，為新能源時代預作準備。

在強化電網結構方面，張文旗指出，台電採取「分散化」與「數位化」並行的策略。過去，台灣電力網絡多集中於少數主幹線與超高壓變電所，一旦發生事故，影響範圍往往極廣。最典型的例子便是 921 大地震，南投中寮超高壓變電所震毀，造成彰化以北大規模停電，也凸顯台灣能源體系的脆弱性。

歷經 20 年淬鍊，隨著智慧科技成熟，台電於 2022 年啟動為期 10 年、總經費 5,600 億元的「強化電網韌性建設計畫」，以「分散、強固、防衛」三大工程主軸推動，重點包括增加配送節點與電廠之間的超、特高壓線路，並大幅導入配電饋線自動化系統，全面提升輸配電的智慧整合力。

事實上，在計畫正式啟動前，台電早已邁開智慧運用腳步，譬如全面布建智慧電表、推動智慧配電 2.0，目前工業等高壓用電戶均已設置智慧電表，藉此即時回應用電需求，並透過 AI 分析提升用電效率；而一般家庭等低壓用電戶，則採階段性換置，逐步累積大數據，作為配電規劃的重要依據。

此外，全面興建智慧變電所亦是一大關鍵改革。台電逐步將傳統變電所改建為智慧變電所。過去，路邊常見由多座高鐵塔組成的變電所，占地廣大、電線密布，有人視為工業風景，有人則認為破壞市容，甚至對健康與安全心生疑慮。

如今，智慧變電所已走向垂直式、屋內化或地下化設計，行人經過時未必察覺其存在，不僅有助都市景觀與空間發展，也能有效降低外力破壞與極端天候帶來的風險。



台灣電力公司輸供電事業部南區施工處大樓採用「變電所屋內化」設計，將核心電力設施隱身於現代化建築內，融合大面積綠美化與城市景觀，翻轉電力設施的傳統形象。(台灣電力公司輸供電事業部南區施工處提供)

除了外觀上的差異，張文旗進一步指出，智慧變電所最大的突破，在於導入國際規範 IEC61850 監控架構，將各變電所設備資訊統一匯整至台電各 ADCC（區域調度中心）監控台，透過遠端監控與下達作業指令，即便是無人值守的變電所，也能確保電力暢通。

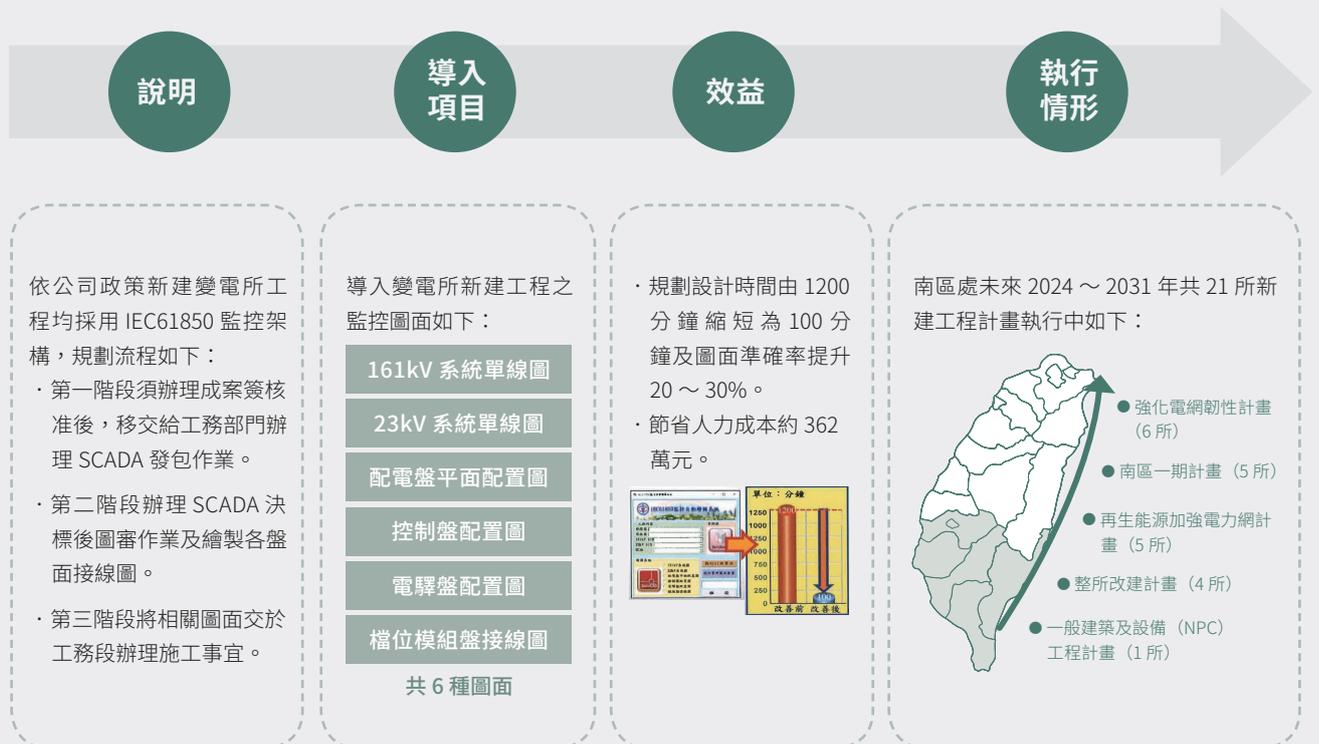
為落實智慧配電 2.0，台電亦全面建置可匯集所有數據的先進型配電管理系統（ADMS）進行整合分析，再搭配智慧電表，使台電能更快速、精準地偵測停電區域，一來可減少人員巡檢時間，二來可加速復電，減少用戶不便與經濟損失。

同時，台電大幅導入配電饋線開關自動化（復閉）系統，當變電所設備發生故障時，輸電開關會先自動跳脫（打開），延時後再自動投入（閉合）；即假設障礙已自動排除，就會繼續輸電。但如果智能開關還是自動跳脫（打開），工程人員就會立即查看原因。

如此一來，透過感應器與智能開關的智慧化運用，台電得以即時偵測並隔離設備故障點，不僅縮小停電範圍，也提升跳電再復電的處理速度，大幅縮短民眾停電時間，提升電網穩定度。

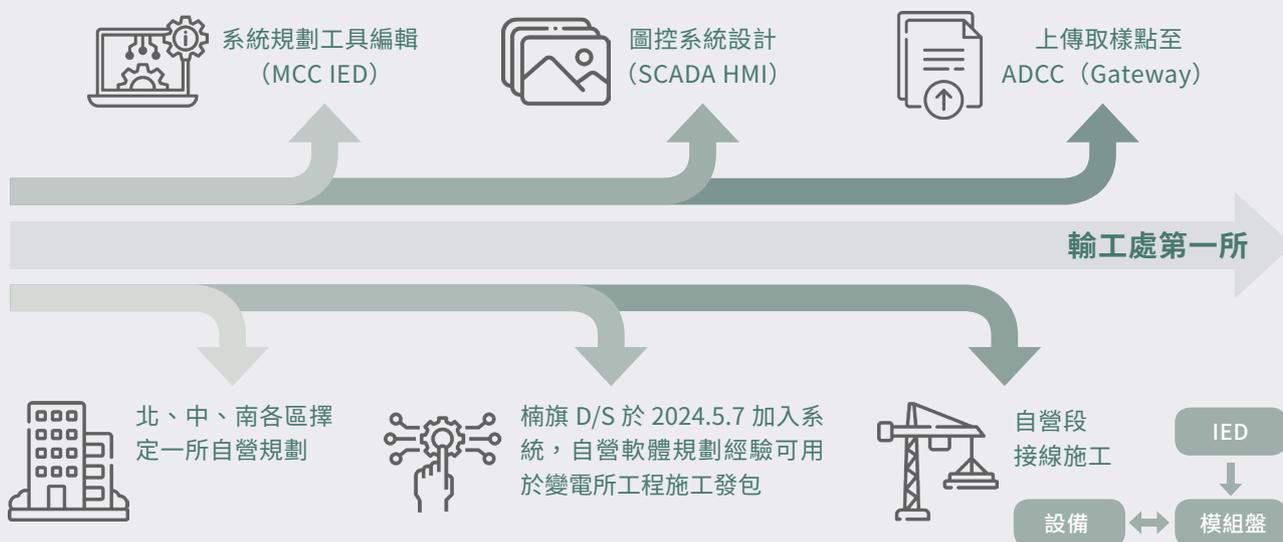
AI 技術應用 / 規劃進展

導入 AI 技術開發自動繪製智慧變電所 IEC61850 監控圖面



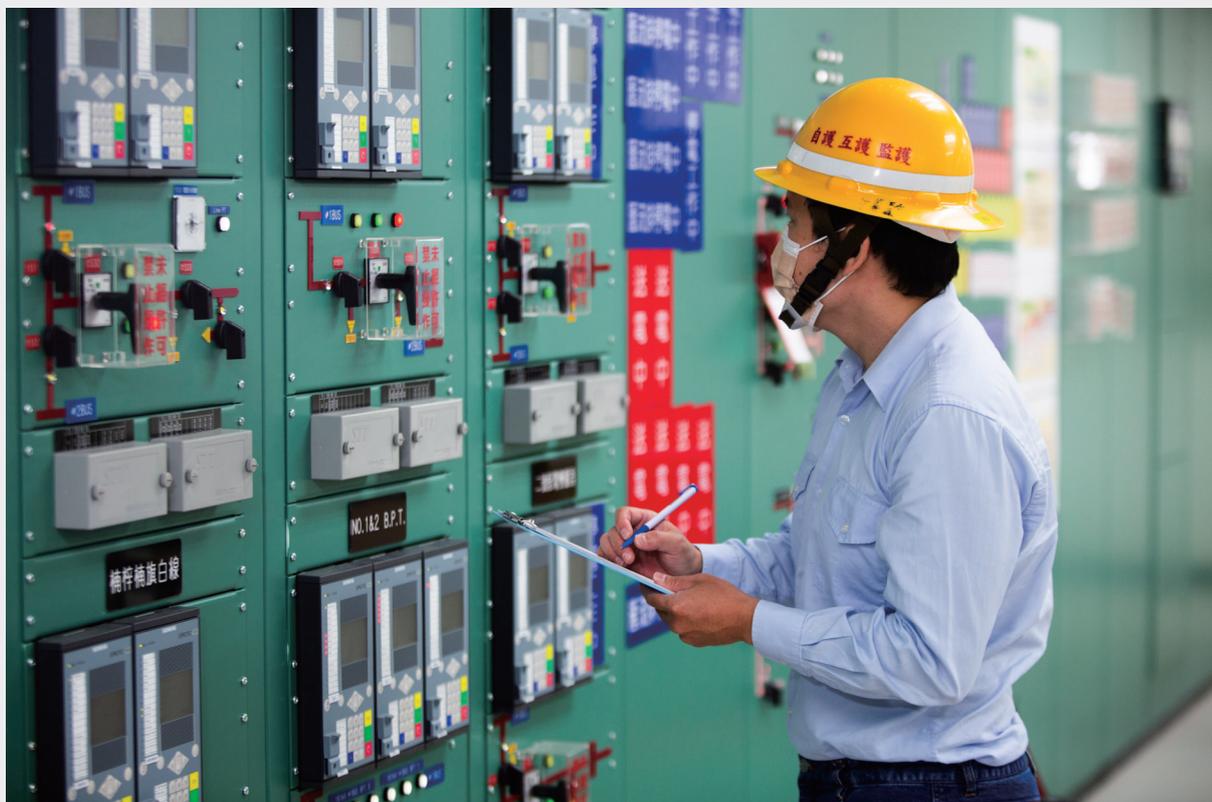
台電南區施工處導入 AI 繪圖技術自動化生成監控圖面，使規劃設計時程從 1,200 分鐘大幅縮減至 100 分鐘，顯著提升工程精準度與人力效益。

IEC61850 監控架構自營規劃



自營設計方式 IEC61850

台電推動變電所監控架構自營規劃，透過智慧化系統落實遠端監控，確保無人值守變電所之電力傳輸穩定無虞。



工程人員檢視先進配電設備。透過智慧化開關系統，能在發生事故時自動隔離故障點，縮小停電影響範圍並加速復電時程。

智慧化管理，防範錯誤

再從智慧化運維管理來看，攤開台電工程單位的工作地圖，北、中、南三個施工處各像是一家工程營造商，每處每天要掌管數十個施工地點，有些是興建變電所、有些是鋪設電網；有人要爬上 80 公尺高鐵塔，有人要鑽入 40 公尺深地底下工作，每個工程任務、設計思考、施工繁雜度都不同。

因此，智慧化管理成為台電追求永續的重要經營思維。近年來，台電積極建置 E 化管理平台，導入公文檔案整合、ERP 等系統。現在走進台電輸供電事業部南區施工處，可發現這裡處處充滿智慧運用，且其中部分新系統更由南區施工處自行研發導入，「期盼藉此提升工程品質與效率管理，」張文旗表示。

過去跨部門或同事之間合作多仰賴電話或紙本公文聯繫，有時人員隨手一寫貼在桌上就會忘了待辦事項，或趕不上截止時間處理完畢。為此，多達 23 個部門的台電南區施工處自行研發出聯繫單管理系統，所有人皆可線上填寫聯繫事項，系統會自動提醒收件人注意內容與時間，若收件人無回應，系統會多次主動提醒，主管可一目了然所有任務的執行狀況。

在掌握進度的同時，工安始終是台電執行工程的最高原則。台電南區施工處自行研發工安查核暨預警系統，每天由專人查核不同施工地點的工安執行狀況，譬如有幾人沒戴安全帽、哪些作業有工安疑慮等，統統都會被記錄、統計下來，作為工安檢討依據，系統亦會自動提醒改善作為。

燈號	燈號說明	工程編號	工程名稱	燈號段	歷次查核	本月已查核	已預約查核	查核次數上限	登記
●	2024/12/07 由藍燈轉 綠燈 綠燈持續 181天	B2021656XA15013、 B2021656XA15014、 B2021656XA15015	貴舍一次配電變電所(R/S)新建土建統包工程 決標金額：919,960,650	五段	116	1	0	2	登記>>

台電輸供電事業部南區施工處自主研發「工安查核暨預警系統」，數位化掌握工地執行現況並落實主動提醒，實踐「預防勝於治療」的安衛精神。

此外，台電南區施工處還善用 LINE 群組的聯繫功能，每個工地皆設有工作群組，主管需每日回報當日工作事項、狀況，遇到問題可即時詢問，力求在第一時間解決現場施工問題，「而且透過線上聯繫讓所有對話都有憑有據，一旦出錯即可追溯決策過程有何瑕疵，作為往後改進依據或注意事項，」張文旗直言。

張文旗也強調：「維持電力工程品質，同樣是預防勝於治療。」為了預防老舊機器突然當機，造成電力配輸停擺，台電運用物聯網、大數據分析等 AI 技術，隨時監測設備運轉狀態，以便及早發現老舊機器的潛在問題或故障徵兆，「希望將事後搶修，變成事前預防的運營思維。」

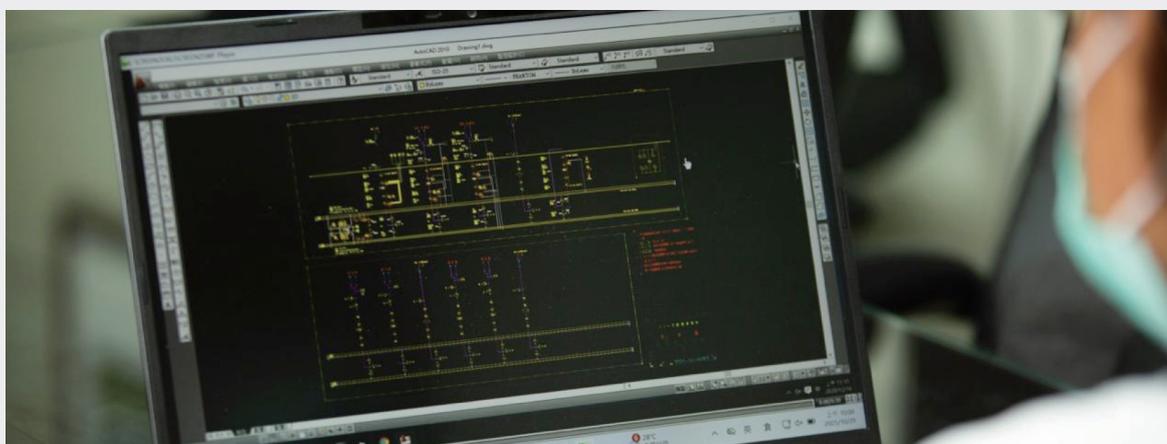
自主開發 AI 自動繪圖系統，提升設計效益

台電透過多重線上管理平台展現智慧化，並提升工程品質與安全，但其實因應建構韌性智慧電網這個超級任務，台電施工處設計部門常常是處於高壓、超時的工作狀態，「不僅同時要面對的工程項目愈來愈多，設計繁雜程度也愈來愈高，」張文旗坦言。

為此，充滿創新思維的台電南區施工處設計部門又自主研發 AI 自動繪圖系統，這套系統不僅導入 AI 深度學習演算法，可協助設計人員推算開關設備的最佳配置參數，再運用 AutoCAD 繪圖軟體的程式語言開發出自動繪圖系統，高度智慧化曾獲得台電創新成果第一名殊榮。

開發出 AI 自動繪圖系統後，假設台電南區施工處要興建一座智慧變電所，設計人員只需把該處空間大小、梁柱位置、設備需求等條件輸入至系統，即可先透過智慧演算，再自動生成最佳設計圖面，實際操練後，張文旗發現這不僅能有效減少規劃設計之錯置，更能大幅縮短設計時間。

當初台電南區施工處開發這套自動系統煞費苦心，「但我們自己研發，還是比較能理解自身需求，」張文旗指出，設計部門主管回憶當初撰寫程式過程中花費最多時間的就是不斷除錯，後來透過不斷學習新技術才終於完成，現在台電南區施工處也將這套系統分享給台電其他施工單位。



獲台電創新成果殊榮之「AI 自動繪圖系統」。系統結合深度學習演算法，能精準推算設備最佳配置，減少人為規劃誤差。

3D 掃描，清楚掌握施工所有狀態

因應新能源時代來臨，台電正緊鑼密鼓進入電力工程轉型期，在新建過程中，保存舊歷史對台電而言是一項重要工作，尤其台電的經營理念是「誠信、關懷、服務、成長」，張文旗表示：「對歷史的尊重是關懷的一環。」為此，台電善用新智慧技術來進行舊歷史保存。

如同前述，台電在 40、50 年代興建的屋外式變電所逐漸面臨改建命運，但礙於每個地區電力都無法長期停供，或新建腹地不足等問題，目前台電針對傳統變電所改建多採取「先建後拆」方式，然而，在拆除之前，台電認為應先妥善保存舊建築與地方環境之原有樣貌，供後人參考。

譬如台電南區施工處曾在台南市東區新建屋內變電所，其所在位置鄰近原有變電所附屬宿舍區，這些宿舍多為 50 年以上的建物，具有文化意涵與價值，當時台電南區施工處特地運用無人機、3D 掃描與點雲建模技術，真實記錄下宿舍區的外觀實景與立體座標，「以後人們想起這裡時，透過記錄影像就可以看見它原始的樣貌，」張文旗指出。

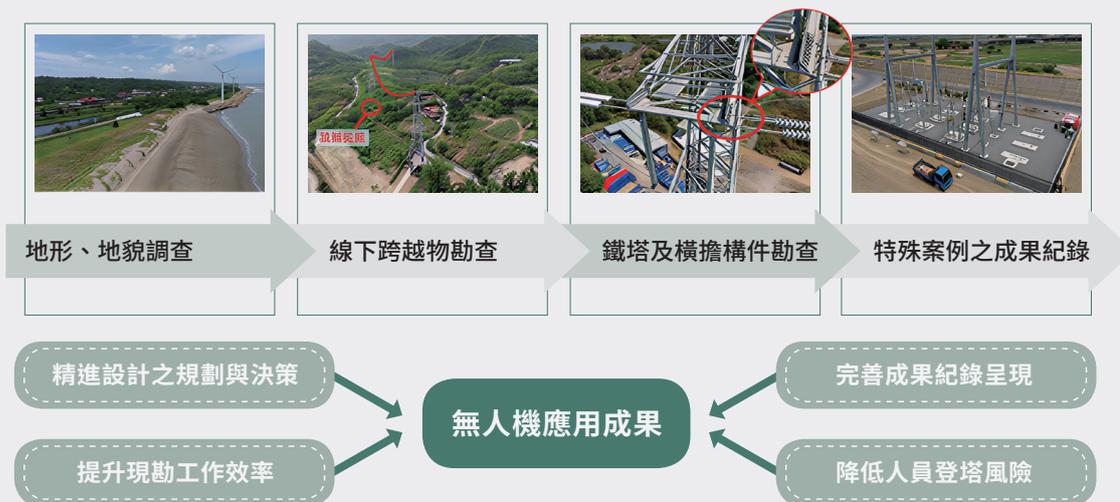
目前，這套技術開始運用在工程設計上，譬如透過點雲快速生成立體模型，可協助設計單位進行施工前的模擬與比對，以減少設計誤差。接下來，台電計畫將這套技術運用到更多老舊電力設施與變電所改建工程，並結合 E 化管理平台，建構智慧工程資料庫，讓老智慧成為新未來的發展基礎。



運用 3D 掃描技術進行歷史建物記錄與工程模擬，透過高精度的點雲建模，在改建過程中同時兼顧文化保存與設計精確度。

在綠能、淨零雙重目標下，電力工程挑戰將愈來愈嚴峻，所幸台電懂得擁抱新智慧科技，持續為企業注入更多成長動能，譬如台電正積極導入無人機技術，藉由高空影像智慧分析讓施工單位更能掌握現場所有狀況。未來，台電還將更廣泛推動智慧巡檢與數位化管理，力求電力建設更安全可靠，也更智慧。

前瞻性議題－無人機應用



台電運用無人機技術執行地形勘查與線路巡檢，不僅提升現勘紀錄的完整性，更有效降低同仁登塔作業的職安風險。



台電輸供電事業部南區施工處處長張文旗(中)帶領團隊與世曦工程交流前瞻工法，共同精進電力基礎建設的韌性，確保工程建設維持卓越品質。

整合資料庫與大型語言模型 進行物價調整之應用

關鍵詞 Keywords

- # 關聯式資料庫 Relational Database
- # 大型語言模型 Large Language Model (LLM)
- # 生成式人工智慧 Generative AI
- # 物價調整 Price Survey

台灣世曦工程顧問股份有限公司 高雄工程處

協理

蔡同宏

計畫經理

鍾增煌

工程師

周育豎

國立高雄科技大學 營建工程系

副教授

陳懿佐

政府為降低因物價波動而影響施工廠商執行之風險，針對公共工程契約之分期計價，訂定可依營建物價總指數進行物價調整。然當特定材料或工項價格出現劇烈變化時，總指數往往無法真實反映該類成本之實際增減情形。為使物價調整更具代表性，廠商得依中分類或單分類物價指數進行計算，以反映不同材料類別之實際波動。此制度理論上可更精準呈現施工成本變化，有助於維持契約履約之公平性與穩定性。

在實際執行過程中，詳細價目表所列工項繁多，各工項單價須依其單價分析中所屬分類進行比對，並逐期套用對應之物價指數進行計算。此過程需耗力費時，且易因分類判定或指數選擇不當而產生爭議。由於計算作業過於繁瑣，許多施工廠商選擇放棄使用中分類或單分類指數調整機制，而僅以總指數進行簡化處理。此現象使政府原設制度無法充分發揮其應有的調節功能，亦影響施工廠商成本回收之準確性與契約履約之公平性。

因此，本研究嘗試探討如何透過人工智慧技術與資料庫整合，協助自動化分析工項分類及指數對應，以簡化物價調整計算流程。藉由結合數據管理與大型語言模型，可望建立更有效率且具一致性的物價調整輔助機制，進而提升工程管理之精確性與決策效能。



壹、技術探討 - 以 LLMs 進行分類

隨著自然語言處理 (Natural Language Processing, NLP) 技術的快速發展，大型語言模型 (Large Language Model, LLM) 已成為語意分析與分類任務的重要工具。Bunt 等 (2025) 研究指出，LLM 具備深層語意理解能力，能在心理學文本分類任務中達到與人工標註相當的準確度，證實其作為語意分類器 (semantic classifier) 之可行性 (Bunt et al., 2025)。Liu 等 (2024) 進一步提出「LLMEmbed」架構，透過 LLM 產生文本 embedding 以進行輕量化分類，顯示 LLM 除可直接進行語意分類外，

亦能作為語意向量化與特徵萃取工具 (Liu et al., 2024)。

此外，Abu-Salih 等 (2025) 在探討語意互操作性 (semantic interoperability) 時指出，LLM 可作為語意中介層，協助異質資料在不同分類體系之間進行語意映射與標準化，有助於資料庫中多層次分類資訊的統一管理 (Abu-Salih et al., 2025)。Bertolotto 等 (2024) 則利用 LLM 自動生成影像分類之語意描述 (class descriptions)，強調 LLM 可提升分類標籤的解釋性與可讀性 (Bertolotto et al., 2024)。此概念同樣適用於工程單價分析之文本資料，可藉由 LLM

生成具語意關聯的分類標籤，以輔助自動化分群判定。

在實務應用方面，Lindholz 等 (2025) 比較 LLM 與語意向量 (semantic embeddings) 模型在醫學報告自動分類任務之效能，結果顯示 LLM 於語意與語境層面的理解優勢顯著，特別適用於需解析自然語言描述與專業術語共存的文件 (Lindholz et al., 2025)。此結果顯示 LLM 可用於工程文件中混合技術詞彙與自然語言的工項說明分析，協助準確判定物價指數對應分類。

綜合上述研究可知，LLM 不僅能有效執行語意分類任務，亦能作為結構化資料整合與語意對映之橋樑。將 LLM 與資料庫系統結合，可在公共工程分期計價中，實現工項分類自動化與物價調整運算的智慧化流

程。此類整合式系統可望提升資料處理效率與分類一致性，減少人工參與所造成的誤差，並為工程管理決策提供可解釋且可擴展性的智慧輔助工具。

貳、系統架構

本研究建置之自動化物價調整系統，整體分為三個主要模組，分別為資料整合模組 (Database Integration Module)、語意分類模組 (Semantic Classification Module) 及應用模組 (Application Module)。系統核心以 Microsoft Access 為資料管理主體，並結合 Excel VBA (Visual Basic for Applications) 及大型語言模型 (Large Language Model, LLM)，實現營建工程分期物價調整中「單分類指數」的自動化計算作業，其系統架構圖如圖 1。

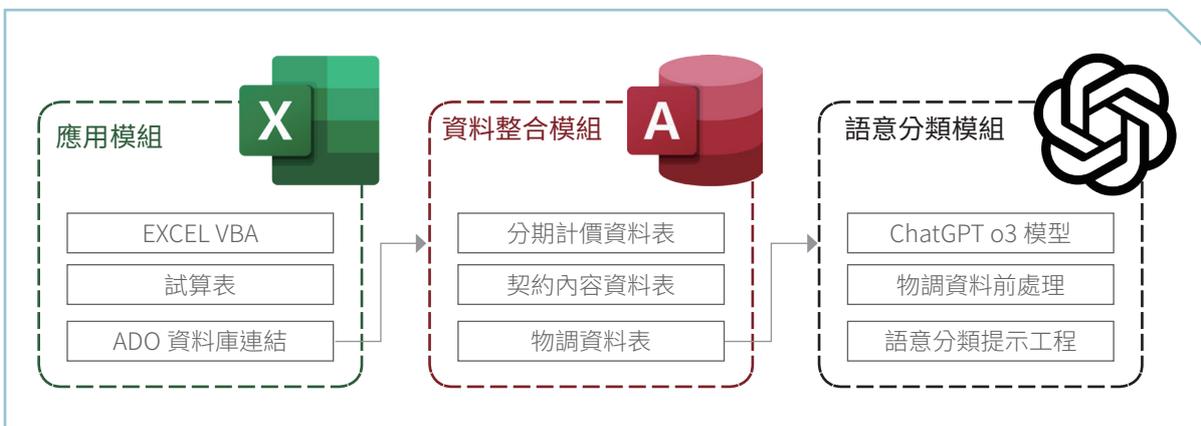


圖 1 系統架構圖

一、資料整合模組 (Database Integration Module)

本模組以 Microsoft Access 為關聯式資料庫 (Relational Database Management System, RDBMS) 核心，依據公共工程分期計價與

單價分析之結構，建立標準化資料表以支援跨模組運算。主要資料表包含：

(一) 工項主檔 (Item Master)

記錄工項編號、名稱、單位、契約單價與工項類別，為主要索引鍵 (Primary Key)。

(二) 單價分析表 (Item Analysis)

記錄各工項的工料分析內容，包括材料名稱、數量、比重與成本占比，與工項主檔以外鍵關聯。

(三) 物價指數表 (Price Index)

儲存營建物價總指數、中分類與單分類指數數值，並含指數發布期別與來源單位。

(四) 期別資料表 (Period Info)

記錄分期計價期數、起訖日期、基期設定與適用範圍。

資料擷取與同步以 ActiveX Data Objects (ADO) 技術完成，透過 VBA 程式在

Microsoft Excel 環境中連結 Access 資料庫，支援即時查詢與自動運算。此設計兼具資料一致性 (Data Consistency) 與查詢效率 (Query Performance)，並可依使用者輸入自動擷取期別與對應指數資料。

二、資料庫架構 (Database Schema)

本研究設計之資料庫架構，係依據公共工程分期計價與物價調整作業流程進行模組化規劃，整體分為三大資料群組，分別為「分期計價資料表」、「契約內容資料表」及「物調資料表」。其設計目的在於整合不同資料來源與層級間之邏輯關聯，建立具備可追溯性與可擴充性的關聯式資料庫基礎，以支援後續自動化物價調整與分析作業，資料庫架構圖詳圖 2。

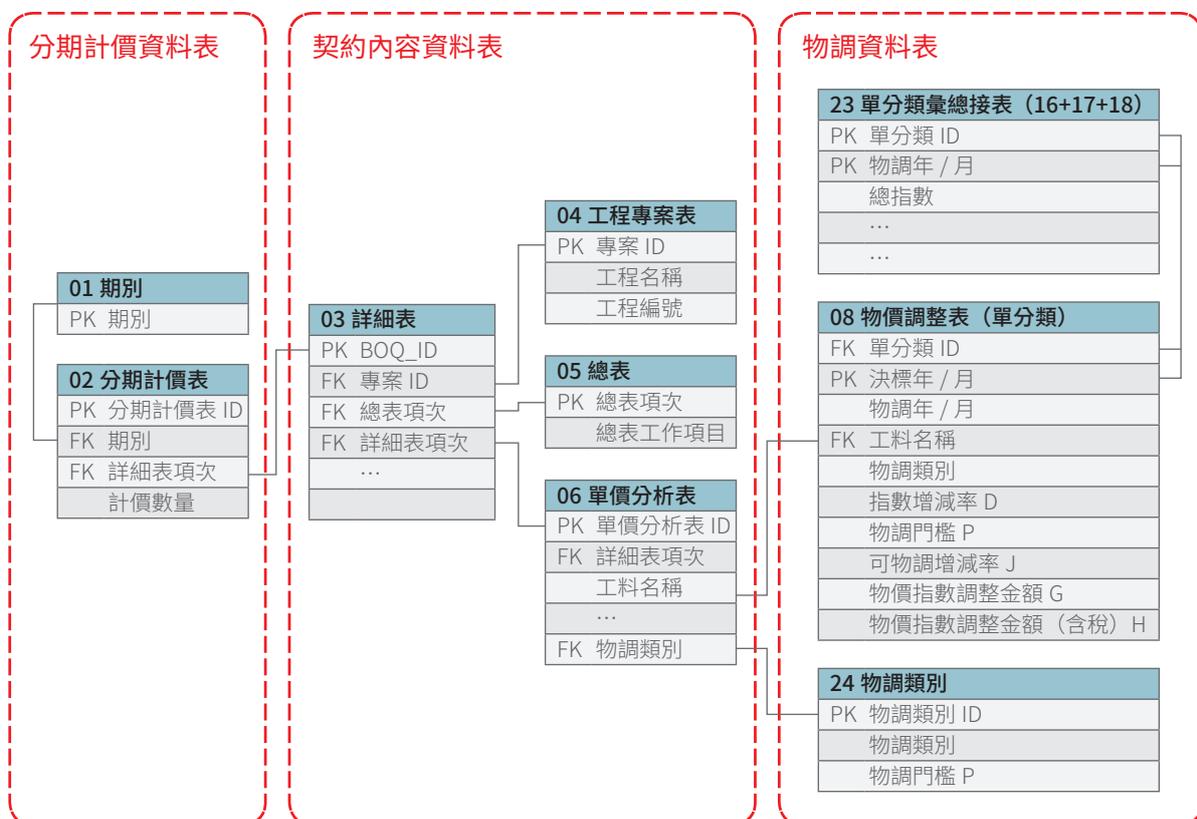


圖 2 資料庫架構圖

表 1 資料庫欄位列表

資料表名稱	簡要說明	欄位說明
01 期別	紀錄各期分期計價資訊	期別
02 分期計價表	儲存每期分期計價細項與對應數量	分期計價表 ID (PK) ; 期別 (FK) ; 詳細表項次 (FK) ; 計價數量
03 詳細表	紀錄工程各項目之明細資料與契約單價	BOQ_ID (PK) ; 專案 ID (FK) ; 總表項次 (FK) ; 詳細表項次 (FK) ; 工項名稱 ; 單位 ; 契約數量 ; 單價
04 工程專案表	管理工程專案之基本資料	專案 ID (PK) ; 工程名稱 ; 工程編號
05 總表	定義總表項次及主要工作項目	總表項次 (PK) ; 總表工作項目
06 單價分析表	儲存各工項之單價分析資料與對應物調類別	單價分析表 ID (PK) ; 詳細表項次 (FK) ; 工料名稱 ; 單位 ; 數量 ; 單價 ; 複價 ; 物調類別 (FK)
08 物價調整表 (單分類)	儲存各期之物價調整計算結果與對應指數	單分類 ID (FK) ; 決標年 / 月 (PK) ; 物調年 / 月 ; 工料名稱 ; (FK) 指數增減率 D ; 物調門檻 P ; 可物調增減率 J ; 物價指數調整金額 G ; 物價指數調整金額 (含稅) H
23 單分類彙總接表 (16+17+18)	整合各類鋼筋、型鋼、鋼板等指數資料，提供加總指數	單分類 ID (PK) ; 物調年 / 月 (PK) ; 總指數 ; 不含 (16 鋼筋) 之總指數 ; 不含 (17 型鋼) 之總指數 ; 不含 (18 鋼板) 之總指數 ; 不含 (16 鋼筋、17 型鋼) 之總指數 ; 不含 (16 鋼筋、18 鋼板) 之總指數 ; 不含 (17 型鋼、18 鋼板) 之總指數 ; 不含 (16 鋼筋、17 型鋼、18 鋼板) 之總指數 ; (16 鋼筋) 指數 ; (17 型鋼) 指數 ; (18 鋼板) 指數
24 物調類別	定義物價調整類別及門檻值設定	物調類別 ID (PK) ; 物調類別 (PK) ; 物調門檻 P

三、語意分類模組 (Semantic Classification Module)

本模組利用大型語言模型 (LLM) 進行自然語言理解 (Natural Language Understanding, NLU)，以自動分類單價分析表中的材料與工料項目。

系統採用 ChatGPT o3 模型作為語意判斷引擎，結合「營建工程物價 (Construction Cost Index, CCI)」的官方分類規範，將單價分析項目自動歸屬至對應之物價指數類別 (例如：16 鋼筋、17 型鋼、18 鋼板、40 模板、2 預拌混凝土等)。分類流程包括：

(一) 資料前處理 (Text Preprocessing)

清除工料名稱中之單位、數值及冗詞，統一格式以利語意比對。

(二) 語意解析 (Semantic Parsing)

利用 LLM 的 contextual embedding 能力理解文字語境，進行分類判斷。

(三) 分類對應 (Classification Mapping)

比對 CCI 標準分類表，自動產生中分類及單分類代碼。

(四) 結果驗證 (Result Verification)

輸出結果與 Access 資料庫中既有標準對照表比對，並以信心值 (Confidence Score) 評估分類正確性。

實測結果顯示，系統以 ChatGPT o3 模型進行語意分類的準確率達 98.03%，主要誤判來源為工料名稱混含工資、試驗項或多義詞。若於提示詞 (Prompt) 中加入單位判定邏輯 (如：T、kg、m²、m³ 等)，

可進一步提升分類準確率至 100%，顯示 LLM 應用於營建工料語意分類具高度潛力與穩定性。

四、應用模組 (Application Module)

應用模組為系統運算與成果輸出的核心，負責進行物價指數比對、分期計價金額計算及成果報表生成。

系統以 VBA 撰寫核心邏輯，搭配 Access 資料庫查詢，完成自動化的物價調整流程。主要功能如下：

(一) 指數比對與門檻判斷 (Threshold Detection)

自動查詢當期各「個別項目指數」之漲跌幅 (ΔD)，若超過 $\pm 10\%$ 即啟動「個別指數」調整機制，並同時自動改用「不含該項目指數之總指數」進行其他項目計算。

(二) 金額運算與分期計價 (Computation Module)

依據以下公式自動計算各期調整後單價：

$$\text{調整後單價} = \text{原單價} \times \frac{\text{當期指數}}{\text{基期指數}}$$

(三) 結果匯出與可視化 (Reporting and Visualization)

以 Excel 自動生成「物價調整明細表」及「期別分析表」，使用者可一鍵查詢各期指數、金額與補貼款計算結果。

系統具備完整的運算邏輯驗證機制，能正確處理多個個別項目同時達門檻的情境，並以稽核紀錄 (Audit Trail) 保留每次指數與金額比對結果。經實務測試，以鳳山某大樓工程為例，系統在多情境模擬下均能

正確判斷物調門檻並產出計算成果，其運算結果與人工比對完全一致。

本系統以 Microsoft Access 為資料整合平台，搭配 ChatGPT o3 模型進行語意分類，並透過 Excel VBA 實現自動化計算與報表生成。此架構不僅簡化傳統物價調整作業流程，亦提升分類準確性與計算透明度，展現人工智慧輔助於公共工程估驗作業之實務可行性與技術成熟度。

參、研究結果與討論

一、大型語言模型 (LLM) 輔助工料分類：

以 ChatGPT o3 補助，將 2,078 項契約工料名稱，進行「個別項目」物調類型分類 (包含 2 預拌混凝土、16 鋼筋、17 型鋼、18 鋼板、40 普通模板)，提供上述 5 類各 1 組分類樣版，經檢核發現大型語言模型 (LLM) 分類準確率可達 98.03%，但工料名稱中混有工資、檢試驗及相同分類名稱之工項等較難正確分辨 (如圖 3、4)，

詳細表項次	工料名稱	單位	數量	單價	複價	物調分類	分類對照
壹.甲.一.A.2	模板組立拆模工資	M2	1	200	200	40普通模板)指數	X
壹.甲.一.B.3.1	金屬製品，金屬屋頂系統，鋁合金板t=1.0mm及(含不銹鋼固定座、角度托鐵、止水鋼板、保溫棉、吸音棉及鋼承板)(30分鐘防火時效)	M2	1	6700	6700	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.3.1	不銹鋼板，304類，天溝，t=1.2mm(含開孔)	式	1	532	532	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.3.10	金屬製品，1.5t不銹鋼板材HL	M2	1	1900	1900	(18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.3.17	產品，金屬製品，1.5mm不銹鋼板材料費(含成型加工費)	M	1	1500	1500	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.5.4	產品，烤漆鋼板1.6t+2'60K岩棉+錫箔(1HR)	M2	1	1550	1550	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.5.8	鋼門扇及門樑，110*260cm鍍鋅鋼板烤漆金屬門+2.5t鋁板(陽極處理)	樑	1	33000	33000	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.5.52	鍍鋅鋼板烤漆捲門片密閉式780*425cm(60A)	樑	1	598000	598000	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.B.6.25	產品，金屬材料，不銹鋼板排水槽，W=10CM,h=5CM厚1t(含3MM扁鋼格柵式不銹鋼溝蓋SUS#304)	M	1	8000	8000	18鋼板)指數	X
壹.甲.一.C.1.1.1	機械拆除，結構物拆除(建築物以外之結構物拆除)，混凝土，含運費	M3	1	100	100	2預拌混凝土)指數	X
壹.甲.一.C.1.2.35	鋼製模板，U型溝用	M2	1	330	330	40普通模板)指數	X
壹.甲.一.C.1.4.5	分電箱，電源開關箱，不銹鋼板	座	1	10000	10000	18鋼板)指數	X
壹.甲.四.B	鋼板試驗	組	60	1300	78000	18鋼板)指數	X

圖 3 物調類別分類 (分類錯誤)

詳細表項	工料名稱	單	數量	單價	複價	物調類別
壹.甲.一.A.2	模板組立拆模工資	M2	1.000	200.00	200.00	(40普通模板)指數
壹.甲.一.A.3	產品，鋼筋，SD420W，工地交貨	T	1.100	17,500.00	19,250.00	(16鋼筋)指數
壹.甲.一.A.3	鋼筋，(不含鋼筋供應，含工資、零星工料及機具)	T	1.000	6,490.00	6,490.00	(16鋼筋)指數
壹.甲.一.A.4	產品，預拌混凝土材料費，280kgf/cm2，第1型水泥，工地交貨	M3	1.000	2,530.00	2,530.00	(2預拌混凝土)指數
壹.甲.一.A.5	產品，預拌混凝土材料費，350kgf/cm2，第1型水泥，工地交貨	M3	1.000	2,690.00	2,690.00	(2預拌混凝土)指數
壹.甲.一.A.6	產品，預拌混凝土材料費，420kgf/cm2，第1型水泥，工地交貨	M3	1.000	2,790.00	2,790.00	(2預拌混凝土)指數
壹.甲.一.A.7	產品，鋼構材料費-SN490B	T	1.100	23,970.00	26,367.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.8	產品，鋼構材料費-SN490B	T	1.100	23,970.00	26,367.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.9	產品，鋼構材料費-A572Gr.50	T	1.100	23,110.00	25,421.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.10	產品，鋼構材料費-A572Gr.50	T	1.100	23,110.00	25,421.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.11	產品，鋼構材料費-A36	T	1.100	21,870.00	24,057.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.12	產品，鋼構材料費-A36	T	1.100	21,870.00	24,057.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.13	產品，鋼構材料費-A36	T	1.100	21,870.00	24,057.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.14	產品，鋼構材料費-STK490	T	1.100	25,000.00	27,500.00	(18鋼板)指數
壹.甲.一.A.15	產品，鋼構材料費，C型鋼	T	1.100	21,700.00	23,870.00	(17型鋼)指數
壹.甲.一.B.1.4	產品，支撐鋼管排架-模板底高度≥5.0m	M2	1.000	290.00	290.00	(40普通模板)指數
壹.甲.一.B.2.1	結構用混凝土，預拌，210kgf/cm2	M3	0.100	2,200.00	220.00	(2預拌混凝土)指數
壹.甲.一.B.2.2	結構用混凝土，預拌，210kgf/cm2	M3	0.150	2,200.00	330.00	(2預拌混凝土)指數

圖 4 物調類別分類 (分類正確)

後續可採用手動修正錯誤或增加分類邏輯 (Prompt: 材料分類需加入單位進行判定, 鋼筋、鋼板、型鋼單位 T 或 kg、預拌混凝土單位 m³、模板單位 m²; 如工料名

稱中含有工資、試驗等, 分類為總指數或不含單分類總指數), 即可達成 100% 準確率; 顯示大型語言模型 (LLM) 運用於物價調整之工程材料分類具備相當潛力。

二、解決物調複雜計算邏輯：

透過 VBA 串聯 Access 資料庫, 查詢計價當月各類物價指數 (如圖 5)、判定當月是否達到物價調整門檻, 並計算當月計價金額及各項材料當期計價金額 (如圖 6)。

系統於每期計價作業時, 須先自動判斷各「個別項目指數」是否達到物價調整啟動門

檻, 以決定後續應採用之「總指數」類型進行計算。判定邏輯如下: 當任一個別項目 (例如: 16 鋼筋、17 型鋼、18 鋼板) 之指數漲跌幅 D 超過 $\pm 10\%$, 即視為達到物調啟動門檻, 該項目即依個別指數調整; 同時, 整體總指數計算須改用「不含該個別項目指數之總指數」進行補貼金額運算。

期別	計價指數	計價月分		指數增減率D	物調門檻P	物調比例	是否物調
		決標當月指數	計價當月指數				
		110年1月	110年4月				
3	總指數	94.90	97.34	2.57%	2.50%	0.07%	是
	不含(16鋼筋)之總指數	95.41	97.97	2.68%	2.50%	0.18%	是
	不含(17型鋼)之總指數	95.04	97.41	2.49%	2.50%	不物調	否
	不含(18鋼板)之總指數	95.00	97.37	2.49%	2.50%	不物調	否
	不含(16鋼筋、17型鋼)之總指數	95.60	98.08	2.59%	2.50%	0.09%	是
	不含(16鋼筋、18鋼板)之總指數	95.53	98.01	2.60%	2.50%	0.10%	是
	不含(17型鋼、18鋼板)之總指數	95.15	97.44	2.41%	2.50%	不物調	否
	不含(16鋼筋、17型鋼、18鋼板)之總指數	95.72	98.12	2.51%	2.50%	0.01%	是
	(16鋼筋)指數	90.94	92.49	1.70%	10.00%	不物調	否
	(17型鋼)指數	91.64	95.75	4.48%	10.00%	不物調	否
	(18鋼板)指數	83.29	94.01	12.87%	10.00%	2.87%	是

圖 5 當月指數查詢

期別	計價當月金額	
32	總工程金額	96,310,570
	契約文件載明不予調整金額	1,306,991
	「16鋼筋」材料金額	0
	「17型鋼」材料金額	1,236,681
	「18鋼板」材料金額	3,983,161

圖 6 當月計價金額查詢

以 (圖 5) 為例, 當期 (18 鋼板) 指數增減率已超過 $\pm 10\%$ 門檻, 系統自動判定為達標, 遂以「不含 18 鋼板」之總指數進行物價調整; 若該期同時有多項個別指數達門檻, 系統將依序判定並套用相應組合的「排除型總指數」。

本研究以三項主要個別項目（鋼筋、型鋼、鋼板）為例進行設計，根據三者達門檻與否之組合，可衍生出八種不同物價調整情境：

- (一) 無任一個別項目達門檻（採「總指數」）。
- (二) 僅 16 鋼筋達門檻。
- (三) 僅 17 型鋼達門檻。
- (四) 僅 18 鋼板達門檻。
- (五) 16 與 17 同時達門檻。

(六) 16 與 18 同時達門檻。

(七) 17 與 18 同時達門檻。

(八) 16、17、18 皆達門檻（採完全排除型總指數）。

系統將依據「當月指數查詢表」自動比對各期之個別項目指數變動率，判定該期應採用之總指數類型，並自動帶入該期工程金額，計算出最終物價調整金額。經由此流程，使用者可直觀地確認系統所引用之指數與金額來源均符合邏輯與規範要求，確保計價結果之透明性、可追溯性與可核性（如圖 7、圖 8 所示）。

分析區間	計價月份	計價期別	計價當月總物調款	特定個別項目： [16鋼筋]				特定個別項目： [17型鋼]					
				占契約金額比例：		計價當月指數B	計價當月物價調整款G	計價當月物價調整款(含稅)H	占契約金額比例：		計價當月指數B	計價當月物價調整款G	計價當月物價調整款(含稅)H
				當月估驗計價金額(元)A	指數增減率D				當月估驗計價金額(元)A	指數增減率D			
					$D = [(B/C)-1] * 100\%$	$G = A(1-E)(D-物調門檻)$	$H = G(1+0.05)$			$D = [(B/C)-1] * 100\%$	$G = A(1-E)(D-物調門檻)$	$H = G(1+0.05)$	
110年4月	3		540,222	1,044,529	92.49	30.38%	317,328	333,194	62,857	95.75	21.14%	13,288	13,952
110年5月	4		1,748,244	3,299,919	100.96	42.32%	1,396,526	1,466,352	-	98.93	25.16%	-	-
110年6月	5		17,566,026	-	105.89	49.27%	-	-	-	102.15	29.24%	-	-
110年7月	6		1,618,667	-	107.55	51.61%	-	-	-	102.51	29.69%	-	-
110年8月	7		291,337	144,813	106.43	50.03%	72,450	76,073	-	103.65	31.14%	-	-
110年9月	8		2,704,040	152,587	106.35	49.92%	76,171	79,980	-	103.50	30.95%	-	-
								79,980					

圖 7 物價調整計算表 (1/2)

分析區間	計價月份	計價期別	計價當月總物調款	特定個別項目： [18鋼板]				含或不含特定個別項目之其他工程項目					
				占契約金額比例：		計價當月指數B	計價當月物價調整款G	計價當月物價調整款(含稅)H	占契約金額比例：		計價當月指數B	計價當月物價調整款G	計價當月物價調整款(含稅)H
				當月估驗計價金額(元)A	指數增減率D				當月估驗計價金額(元)A	指數增減率D			
					$D = [(B/C)-1] * 100\%$	$G = A(1-E)(D-物調門檻)$	$H = G(1+0.05)$			$D = [(B/C)-1] * 100\%$	$G = A(1-E)(D-物調門檻)$	$H = G(1+0.05)$	
110年4月	3		540,222	1,740	94.01	32.43%	564	592	3,532,140	98.12	5.19%	183,318	192,484
110年5月	4		1,748,244	-	102.42	44.27%	-	-	4,080,074	99.42	6.58%	268,469	281,892
110年6月	5		17,566,026	27,029,759	107.40	51.29%	13,863,563	14,556,741	37,028,240	100.50	7.74%	2,865,986	3,009,285
110年7月	6		1,618,667	2,191,572	109.57	54.35%	1,191,119	1,250,675	4,248,112	100.98	8.25%	350,469	367,992
110年8月	7		291,337	226,789	108.89	53.39%	121,083	127,137	961,402	101.42	8.73%	83,930	88,127
110年9月	8		2,704,040	3,758,194	107.32	51.18%	1,923,444	2,019,616	6,346,872	101.74	9.07%	575,661	604,444
								2,019,616					
			累計物調金額	214,389,743				81,573,063					123,264,492

圖 8 物價調整計算表 (2/2)

三、系統分析及驗證：

(一) 物價調整結果比較：透過案例分析可發現，採用「總指數」與「個別項目指數」兩種物價調整方式，所得之補貼金額差異顯著。以本研究案例為例，「個別項目指數」之物價調整金額較「總指數」高出 17,143,414 元，差額占契約總

金額 0.69%，為「總指數」調整金額的 105.15%。此結果顯示，當市場面臨急遽物價波動時，「個別項目指數」能更精準反映實際成本變動情形，並具備較佳的抗風險能力，對於維持廠商履約穩定性與工程品質具有正面助益（如圖 9）。

「總指數」					
期別	估驗起迄時間 (年月日)	A計價款			
		包工費	物調款	預付款	當期計價款
		累計包工費	累計物調款	累計預付款	累計計價款
49	113年12月1日	17,166,018	2,021,290	0	19,187,308
	113年12月16日	2,605,185,093	332,850,637	249,680,000	3,150,009,904

「個別項目」										
分析計價月份	計價期別	計價當月總物調款	16鋼筋		17型鋼		18鋼板		含或不合特定個別項目之其他工程項目	
			指數增減率D	計價當月物價調整款(含稅)H	指數增減率D	計價當月物價調整款(含稅)H	指數增減率D	計價當月物價調整款(含稅)H	指數增減率D	計價當月物價調整款(含稅)H
113年12月	47	4,588,926	20.19%	14,722	23.17%	-	32.78%	-	24.64%	4,574,204
113年12月	48	5,855,375	20.19%	16,263	23.17%	-	32.78%	-	24.64%	5,839,112
113年12月	49	2,080,063	20.19%	1,239	23.17%	-	32.78%	-	24.64%	2,078,824
累計物調金額		349,994,051		7,688,579		359,032		75,029,445		266,916,995

***差異金額17,143,414元，契約占比0.69%**

圖 9 物調機制比較

(二) 鑑於近年市場物價波動劇烈，案例於第 3 期計價時，三項主要指數（16 鋼筋、17 型鋼、18 鋼板）皆達物價調整門檻。為驗證系統判斷邏輯與計算模組之正確性，手動調整決標與物調年月，以產生不同物

價指數組合與啟動情境。經多次實測，系統能正確判斷各期應採用之總指數類型與個別項目指數組合，計算結果與人工比對無誤，顯示系統邏輯正確、運算穩定，且具實務可行性。

(三) 情境模擬 (圖 10) : 當 (18 鋼板) 指數達到物調門檻 10% , 而不含 (18 鋼板) 之總指數未達門檻 2.5% 。

1. 確認當月「個別項目指數」是否達到門檻, 僅 (18 鋼板) 指數達門檻。

期別	計價當月金額	期別	計價月分	決標當月指數		指數增減率D	物調門檻P	物調比例	是否物調	
				110年1月	110年4月					
9	總工程金額	115,829,826	9	計價指數	94.90	97.34	2.57%	2.50%	0.07%	是
	契約文件載明不予調整金額	1,767,301		總指數	94.90	97.34	2.57%	2.50%	0.07%	是
	「16鋼筋」材料金額	153,565		不含(16鋼筋)之總指數	95.41	97.97	2.68%	2.50%	0.18%	是
	「17型鋼」材料金額	0		不含(17型鋼)之總指數	95.04	97.41	2.49%	2.50%	不物調	否
	「18鋼板」材料金額	45,013,366		不含(18鋼板)之總指數	95.00	97.37	2.49%	2.50%	不物調	否
驗證金額: 69,049,159		不含(16鋼筋、17型鋼)之總指數		95.60	98.08	2.59%	2.50%	0.09%	是	
		不含(16鋼筋、18鋼板)之總指數		95.53	98.01	2.60%	2.50%	0.10%	是	
		不含(17型鋼、18鋼板)之總指數		95.15	97.44	2.41%	2.50%	不物調	否	
		不含(16鋼筋、17型鋼、18鋼板)之總指數		95.72	98.12	2.51%	2.50%	0.01%	是	
		(16鋼筋)指數		90.94	92.49	1.70%	10.00%	不物調	否	
		(17型鋼)指數		91.64	95.75	4.48%	10.00%	不物調	否	
		(18鋼板)指數		83.29	94.01	12.87%	10.00%	2.87%	是	
分析		特定個別項目: 【 16鋼筋 】								
計價月份	計價期別	計價當月總物調款	當月估驗計價金額(元)A	計價當月指數B	指數增減率D D=【(B/C)-1】*100%	計價當月物價調整款G G=A(1-E)(D-物調門檻)	計價當月物價調整款(含稅)H H=G(1+0.05)			
111年10月	9	1,356,478	153,565	92.49	1.70%	不物調	-			
		特定個別項目: 【 17型鋼 】								
			當月估驗計價金額(元)A	計價當月指數B	指數增減率D D=【(B/C)-1】*100%	計價當月物價調整款G G=A(1-E)(D-物調門檻)	計價當月物價調整款(含稅)H H=G(1+0.05)			
			-	95.75	4.48%	不物調	-			
		特定個別項目: 【 18鋼板 】								
			當月估驗計價金額(元)A	計價當月指數B	指數增減率D D=【(B/C)-1】*100%	計價當月物價調整款G G=A(1-E)(D-物調門檻)	計價當月物價調整款(含稅)H H=G(1+0.05)			
			45,013,366	94.01	12.87%	1,291,884	1,356,478			
		含或不含特定個別項目之其他工程項目								
			當月估驗計價金額(元)A	計價當月指數B	指數增減率D D=【(B/C)-1】*100%	計價當月物價調整款G G=A(1-E)(D-物調門檻)	計價當月物價調整款(含稅)H H=G(1+0.05)			
			69,049,159	97.37	2.49%	不物調	-			

圖 10 情境模擬

2. 確認 (18 鋼板) 指數: 94.01、物調金額: 45,013,366 元, 指數增減率 D: 12.87%, 已達物調門檻 10%, 本期物調比例: 2.87%。

3. 不含 (18 鋼板) 之總指數 97.37、物調金額 -1,767,301 元 -45,013,366 元), 指數增減率 D=2.49%, 未達物調門檻。

3. 不含 (18 鋼板) 之總指數 97.37、物調金額 69,049,159 元 (=115,829,826

4. 實測系統可依據不同情境判定所需當月指數及計價金額, 一鍵算出當期物調款為 1,356,478 元。

肆、未來發展方向

綜合初步成果與實務驗證結果可知，將人工智慧技術與資訊系統整合應用於營建工程物價調整領域，具備高度的可行性與實用性。此研究成果不僅展現了以 AI 為輔之自動化物價調整系統能有效提升估驗效率與準確性，更為公共工程契約管理提供數位轉型的重要參考模式。未來，本研究架構可作為推動營建產業邁向智慧化、數位化與標準化的重要工具與範例。其延伸研究方向如下：

一、大型語言模型之精進與提示詞微調

目前採用雲端大型語言模型 (LLM) 輔助工料名稱分類，後續將針對其誤判案例進行分析，透過資料集微調 (fine-tuning) 與提示詞工程 (prompt engineering) 方式優化分類準確率。同時，將擴充資料集涵蓋更多材料類別與子項目，逐步建立標準化分類詞庫，以提升系統之泛用性、可擴充性與準確性。

二、系統邏輯強化與複雜情境模擬

實務上，營建物價調整常須面對多種例外狀況，例如：部分項目須扣回或同契約項目需採用不同指數等特殊條件。未來將持續蒐集並分析此類情境資料，進一步優化資料庫架構與運算模組，使系統能動態判斷多重條件組合，達到更高的邏輯彈性與實務適用性。

三、政策推動與制度性建議

建議政府機關可參考本研究成果，推動相關政策與技術指引，鼓勵公共工程採用「個別項目指數」作為物價調整依據，以更

精準反映市場實際變動情形。此舉不僅有助於降低廠商履約風險、確保工程品質與進度，也能強化契約執行的公平性與透明性，促進整體營建產業邁向智慧治理與永續發展。

伍、結論

本研究針對營建工程物價調整機制之實務困境，成功開發一套結合 Microsoft Access 資料庫、Excel VBA 自動化模組與大型語言模型 (LLM) 的智慧化系統，有效解決「個別項目指數」計算繁瑣、人工檢核困難的長期問題。系統經多情境運算與實務案例驗證，證實具高度可行性與實用性，能顯著提升估驗效率與運算正確性，並具備推廣至公共工程實務應用的潛力。此成果不僅可強化工程履約風險控管，亦可提升機關與廠商採用「個別項目指數」之意願，對公共工程管理制度具實質貢獻。

研究發現透過 ChatGPT o3 輔助進行營建工料分類，可達到超過 98.03% 的自動分類準確率，大幅降低人力成本及錯誤風險，僅需幾分鐘即可處理數千筆資料，展現大型語言模型在契約資料分類與知識抽取領域的應用潛力。此外，採用模組化設計之 VBA 程式結構，使系統能在多種物價調整情境下快速運算，確保結果一致且可追溯，明顯提高行政估驗作業效率，並有效降低人為疏漏帶來的潛在風險。

透過案例解析發現，面臨物價快速波動的情形，不同物價調整機制將對廠商營運成本與財務風險產生顯著影響。案例中，採用「個別項目指數」與「總指數」兩種機制之間的物價調整金額差異達 17,143,414 元，約占契約總金額的 0.69%，為「總指

數」物調金額的 105.15%。此差異雖僅為單一案場結果，但對於同時執行多案之大型營造廠而言，累積影響將相當可觀，顯示精確選擇物調機制對於整體風險控管的重要性。筆者在實務經驗中觀察到，於採購及成本管理階段，當市場物價短期內劇烈上升，即使具備完善之工程管理制度與成本控制機制，仍可能因物價波動導致毛利迅速被侵蝕，甚至直接產生虧損。此一現象凸顯了物價調整機制之選擇對廠商抗風險能力的深遠影響。因此，建議各級機關及承攬廠商應依工程性質、合約內容及市場波動特性，審慎選擇適當之物價調整類型，以兼顧履約穩定性與公共利益，並為未來營建產業智慧化與數位化治理奠定基礎。

參考文獻

1. 行政院公共工程委員會公布之「機關已訂約施工中工程因應營建物價變動之物價調整補貼原則」 <https://www.pcc.gov.tw/content/index?eid=1753&type=C&lang=1>
2. 羅韋淵，「公共工程契約中物價調整機制之問題研究」，碩士論文，國立政治大學法律研究所，台北市（2009）。
3. 林圓明，「營建物價調整對工程影響探討」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系，基隆市（2022）。
4. Abu-Salih, B., Alfarhood, S., & Zheng, L.. Using large language models for semantic interoperability. *Journal of Information Systems and Technology*, 13 (2) , 102–118 (2025) . <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240595952500092X>
5. Bertolotto, M., Giannini, V., & D' Agostino, D.. LLM-Generated Class Descriptions for Semantically Interpretable Image Classification. *Proceedings of the 19th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2024)* , 403–412 (2024) . <https://www.scitepress.org/Papers/2024/130608/130608.pdf>
6. Bunt, A., Rodríguez, J., & Harari, G. M.. Validating the use of large language models for psychological text classification. *Frontiers in Social Psychology*, 6, Article 1460277 (2025) . <https://doi.org/10.3389/frsps.2025.1460277>
7. Lindholz, M., Reimer, P., & Hildebrand, T.. Comparing large language models and text embedding models for automated classification of textual, semantic, and critical changes in radiology. *European Journal of Radiology*, 182, 110072 (2025) . <https://www.ejradiology.com/article/S0720-048X%2825%2900402-4/fulltext>
8. Liu, X., Zhang, R., & Wang, Y.. LLMEmbed: Rethinking Lightweight LLM' s Genuine Text Classification Paradigm. *Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2024)* , 5142–5157 (2024) . <https://aclanthology.org/2024.acl-long.433.pdf>



預鑄工法之工程效益探討 ——以貴舍 RS 變電所為例

關鍵詞 Keywords

- # 預鑄工法 Precast Construction Method
- # 統包 Design-Build Contract
- # BIM Building Information Modeling
- # 營造四化 Four Changes Of Construction

台灣電力股份有限公司
輸變電工程處南區施工處第五工務段

經理

高豐敏

台灣世曦工程顧問股份有限公司
嘉南工程處

資深協理

張曜洲

副理

陳主文

計畫經理

楊晟豪

工務所主任

邱倍堅

工程師

陳冠育

工程師

張仲鈞



本案為台電首座採用預鑄工法建構之變電所，配合政府強化電網韌性及綠能分散供電政策，於嘉義縣布袋鎮新建貴舍 R/S 一次配電變電所，以因應區域再生能源併網需求。預鑄工法在國內工程界已有多年實際施工經驗，但早期因預鑄等關鍵技術尚未成熟，且單位造價較傳統場鑄工法為高，工程業界使用度及接受度不高。目前台電公司採用預鑄工法，仍以預鑄人孔及電纜涵洞為大宗，面對國內營建人力短缺及工期壓力，統包施工團隊導入預鑄工法及 BIM 數位技術，於設計與施工階段即整合結構、建築與機電資訊，有效提升施工效率與品質穩定性。

自規劃、設計、模擬、預鑄構件製造履歷至現場吊裝組立，全程採用 BIM 數位技術，強化各階段資訊銜接與施工衝突檢討，本工程預鑄構件包含變電所之梁、柱、樓板與外牆，搭配預鑄廠之預製及現場吊裝組立，減少現場大量人力需求，有效大幅縮短整體工期，並於施工期間透過工法變更、施工界面協調控制，以及安全監測等機制，提升現場施工作業安全性，降低施工風險。

本案相較傳統工法每層樓所需施工工期，約可縮短近一半時間，並成功降低二氧化碳排放，展現預鑄工法在工期控制、品質管理、職業安全、環境保護及節能減碳等效益，符合政府積極推動「營造四化」政策，對台電後續變電所等工程具重大參考意義。



壹、前言

近年政府推動強化電網韌性建設計畫，本工程為該計畫之綠能分散供電工程，加入整體供電系統之後，可為嘉義科學園區提供穩定且環保之能源，以加速電子相關產業之發展。然而國內營建產業正面臨著人力短缺的困擾，加上民間擴建廠房及建案急遽增加等因素排擠下，導致在建工程多有工程延宕情事，故工程採用預鑄工法，應是未來趨勢之一。

貳、工程簡介

一、工程目的

貴舍 R/S 一次配電變電所係為配合政府積極推動能源轉型政策建置。隨著全台太陽光電裝置容量持續攀升，嘉義縣布袋鎮周

邊已成為再生能源重點開發區域。鑒於鄰近之一次配電變電所 (D/S) 及二次升壓變電所 (S/S) 之併網容量即將飽和，且嘉義地區之系統併網點不足，故規劃新建貴舍 R/S 一次配電變電所，並採用無人化遠端監控管理模式，以強化嘉義地區電網韌性，並滿足再生能源併網需求，確保嘉義地區之供電穩定。

二、工程概述

工程地點位於嘉義縣布袋鎮樹林頭里 170 縣道旁，北臨貴舍排水，鄰近為國有台糖土地 (詳圖 1)。主要工程內容為於基地空地興建 1 座屋外型臨時模組化設備 (下稱臨時模組化)、1 幢地上 2 層地下 1 層之建築物及 T 型預鑄電纜涵洞 (詳圖 2)，以滿足再生能源案場併網需求，進而提供穩定供電品質。

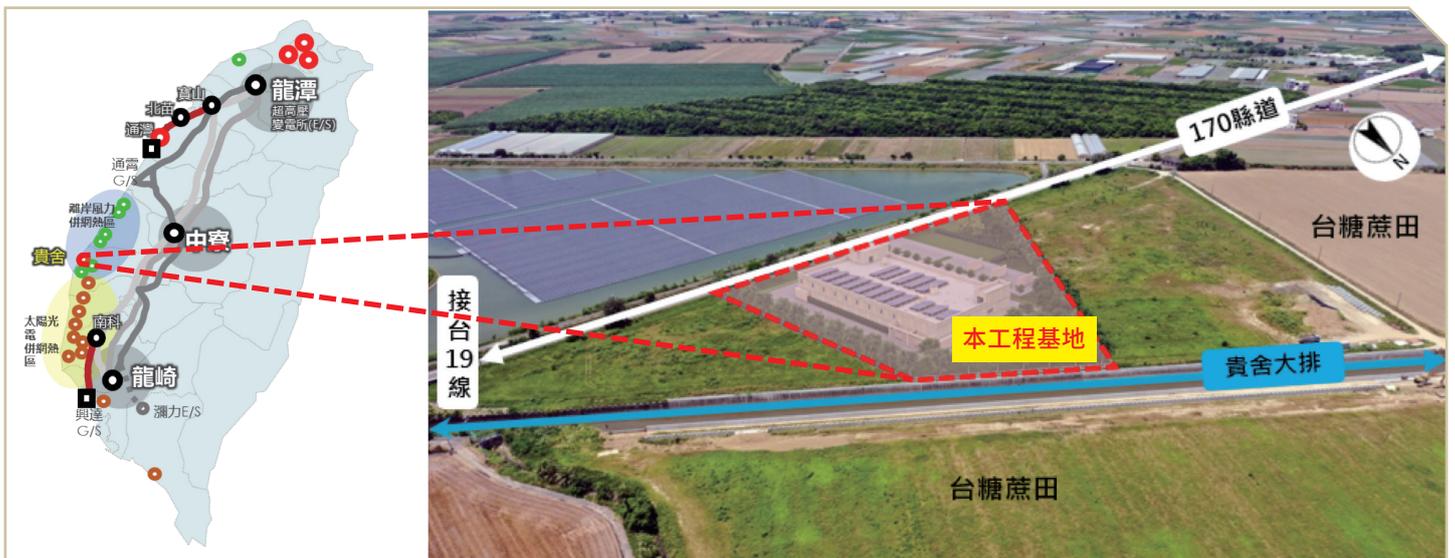


圖 1 工程基地位置圖



圖 2 工程模型圖

本案統包施工團隊考量案址鄰近嘉義科學園區，目前科技廠正如火如荼興建中，且近幾年國內工程長期缺工情形嚴重，為讓工程如期如質交付業主，於最有利標之評選階段，既已規劃除變電所筏基層、地下室外牆及部分樓板開口採用傳統工法外，

於地下室柱以上樓層大量使用預鑄工法，包含變電所之梁、柱、樓板與外牆，搭配預鑄廠之預製及現場吊裝組立，減少現場大量人力需求，降低高空作業之施工風險，並有效大幅縮短整體工期，最後獲得評選委員青睞。



參、預鑄工法導入運用

一、RC 構架預鑄工法

本工程採用 RC 構架預鑄工法（1999，葉文凱、陳永成），並採用半預鑄之梁、柱及樓板設計。構件吊掛安裝完成後，接續進行鋼筋綁紮及水、電配管，隨後進行灌漿作業，使梁、柱與樓板形成整體結構，提升整體性與施工品質（詳圖 3）。預鑄柱之鋼筋採用套筒續接器進行續接，套筒內灌注 850kgf/cm² 高強度水泥砂漿，以確保結構安全。

二、BIM 軟體應用

在預鑄構件的生產與施工流程中，BIM 技術扮演著關鍵角色。為提升設計精度與施工效率，施工團隊依規劃、設計及施工等階段導入多款專業 BIM 軟體加以應用。於預鑄構件生產前，依據結構圖說，先利用 Tekla Structures 進行鋼筋配置與施工可行性之建模與衝突檢討；於施工階段，則進一步依建築圖使用 Autodesk Revit 建立完整的建築資訊模型 (Building Information Modeling)，整合建築、結構及水電等系統資訊，以利檢討各工項之介面衝突，有效降低現場施工錯誤與重複施工風險。

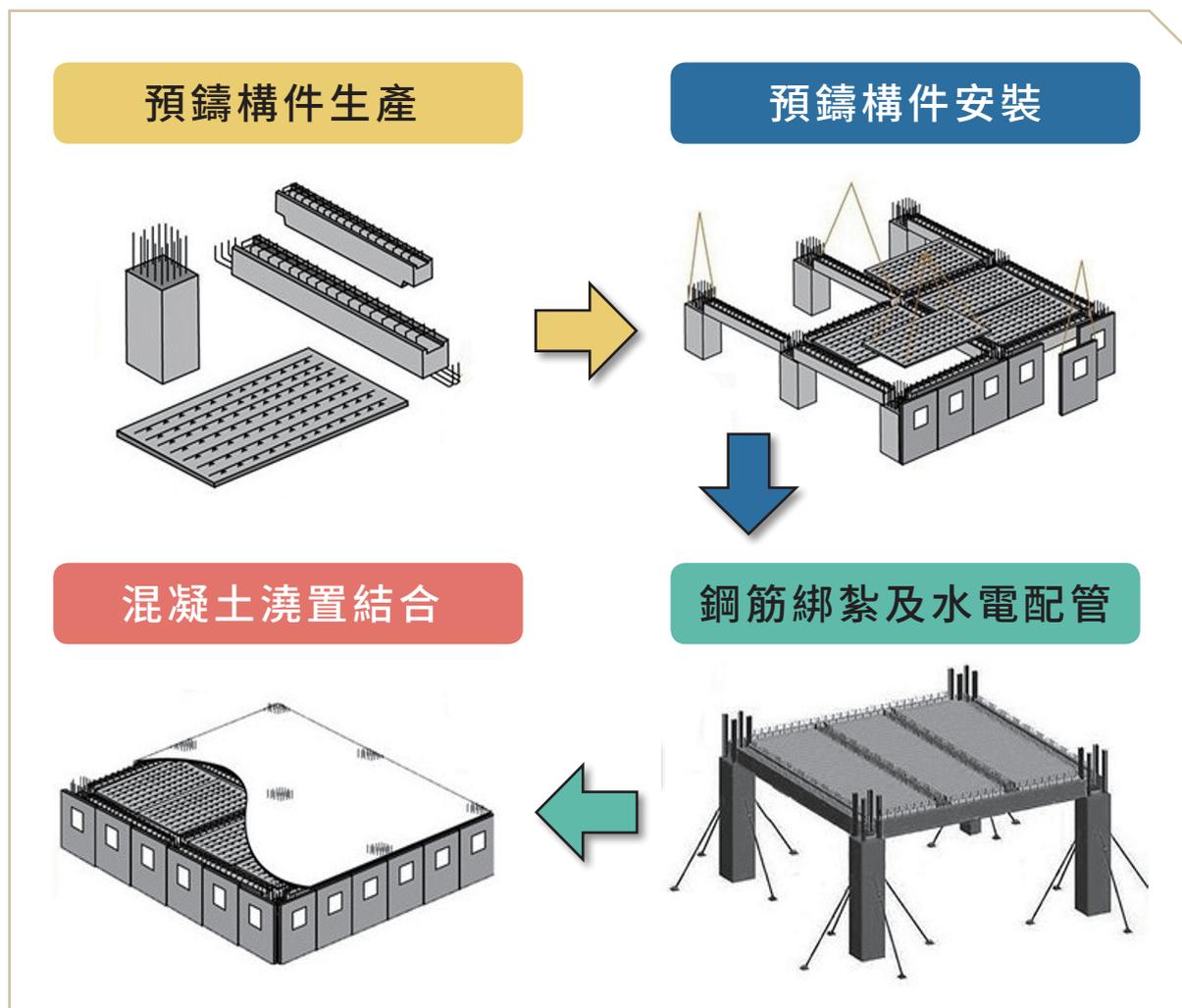


圖 3 預鑄施工流程圖

(一) Tekla Structures 應用

生產製造前採 TEKLA 進行構件設計與鋼筋配筋模擬 (圖 4)，配合預鑄廠各構件生產製造圖，實現「從 BIM 到生產」的一體化

資料鏈。各預鑄構件編配生產履歷，紀錄生產、檢驗、運輸、吊裝全流程資訊，達成可追溯之構件廠製履歷管理。

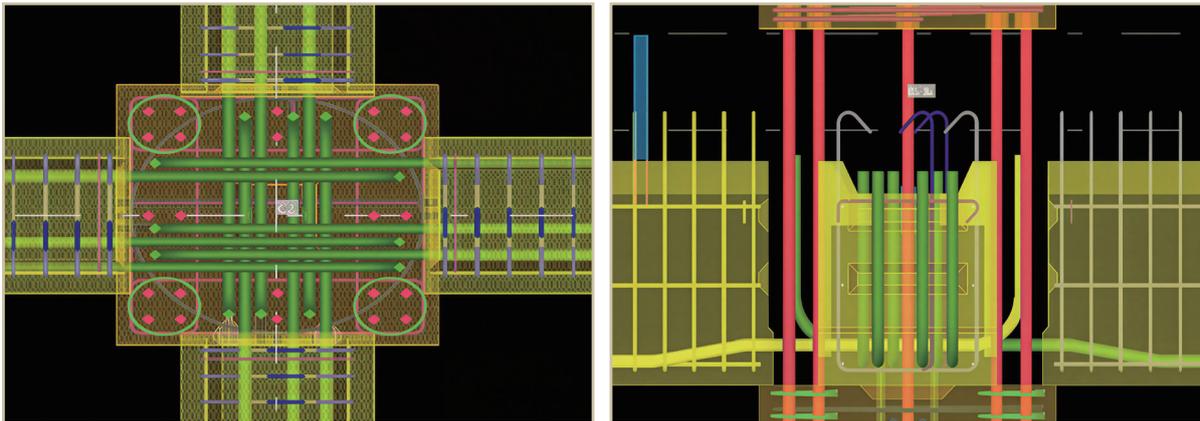


圖 4 TEKLA 鋼筋柱頭配筋模擬

(二) Autodesk Revit 應用

為確保設計與施工資訊的清楚傳達，本案自設計初期即採用 Autodesk Revit 3D 建模導入 BIM 整合模型，將建築、結構及機電三大系統資訊統一整合。透過 BIM 模型進行各系統設備之碰撞檢討、套管配置與施工模擬，能有效降低施工現場發生介面衝突風險，提升整體施工效率與品質控管。

此外，本案亦搭配 BIM 雲端管理平台 (如圖 5)，使各參與單位可即時存取模型資訊，並提供設計回饋。工地端與設計單位定期召開 BIM 施工協調會議，確保模型與實際施工進度保持一致性，有效提升施工精準度。而現場監造人員亦配備智慧行動裝置，透過即時比對 BIM 模型與現場施作情形，提升查核便利性與作業效率，進一步落實智慧化工地管理。



圖 5 BIM 雲端管理平台操作頁面

肆、施工精準度控制

變電所地下室筏基之預留柱筋銜接地下室預鑄柱的介面，係本案預鑄工法之關鍵點。由於預鑄構件在工廠預先製作，其尺寸與安裝定位需精準對應現場場鑄結構，預鑄套筒與每支預留柱筋位置誤差需控制在 $\leq 5\text{mm}$ ，若介面銜接處未能確實對位，將可能導致無法銜接、安裝困難或結構誤差超過允許值等問題。

倘預鑄構件與場鑄預埋構件銜接不良，不僅需額外耗費時間與人力進行調整，嚴重時甚至可能需要敲除構件重製，不但延誤工期，也將大幅增加工程成本，並可能衍生結構安全風險。

為確保變電所地下室筏基之預留柱筋位置與高程達到現場安裝精度，柱筋採用預組方式施作，於上、下層預留柱筋之間設置定位網（詳圖 6），以限制鋼筋相對位置，同時增設吊裝框架，避免吊裝過程中發生鋼筋錯位或偏移。現場亦在柱位樣線上設置定位框架（詳圖 7），有助於準確對位並同步進行高程調整（詳圖 8）。

同時於混凝土澆置前，須進行柱筋位置調整，柱筋銜接端設置角鐵框架固定，並使用張緊器及鋼索從四個方向進行調整固定，以確保其穩定性與定位精度（詳圖 9）。變電所地下室之筏基施工分為底板、地梁及頂板等三次混凝土澆置作業，每一次澆置前皆需進行詳細測量與精度校正，以確保各樓層預留柱筋位皆於容許誤差內。



圖 6 鋼筋定位網



圖 7 柱筋定位框架

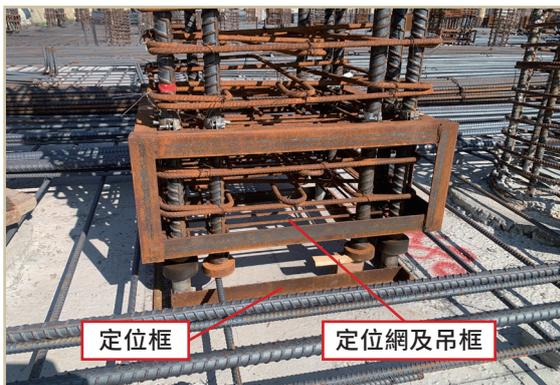


圖 8 柱筋現場吊裝組立



圖 9 柱筋固定調整

伍、防災安全

一、科技防災之應用

預鑄工法現場僅需進行吊裝、定位與接合，大幅縮短工期。然而現場作業仍需長時間進行高空作業，作業人員面臨高溫曝曬與風速變化導致物體飛落等職業安全風險。本工程特別設置微型氣象站，並於現場配置風速儀及簡易氣象監測設備，同時連接勞動部職安署「高氣溫作業防護資訊網」，建立即時風險預警機制（詳圖 10）。

當現場風速超過安全限值時，系統自動啟動推播警示，同步通知現場人員停止吊掛

作業，以確保吊掛作業安全。此外，依據高氣溫作業熱危害預防指引，當氣象資料顯示出現高溫危險情況時，將透過工地廣播與 LINE 群組即時通報，提醒現場勞工適時休息與補充水分，以降低發生熱危害風險，提升整體職安防護層級。

另導入科技輔助管理，於工區設置一支移動式及八支固定式 CCTV，並指派專責監視人員即時監看吊裝狀況（詳圖 11）與作業動線，並結合 UAV 無人機進行高空巡檢（詳圖 12），確保工安無死角管理。監看期間發現異常時即透過 LINE 群組通報，搭配現場即時修正與紀錄，讓防災更即時。



圖 10 微型氣象站及氣象資訊



圖 11 工務所 CCTV 監看圖



圖 12 UAV 無人機高空巡檢

二、吊裝作業安全管理

為防止預鑄構件於吊掛作業中物體飛落風險，施工前即進行吊耳荷重能力檢討，並於構件生產階段預留吊耳與鎖件（詳圖 13），以確保其強度足以承載吊掛過程所需之荷重。同時，為防範作業人員於高空作業中發生墜落風險，梁構件製造時預先留設護欄插銷孔位，於吊裝前即同步安裝護欄設施（詳圖 14），提升現場作業安全。



圖 13 吊耳組裝

在吊裝過程中，配合使用特殊吊具與輔助繩索，有效穩定構件姿態，避免構件於吊運時發生晃動或碰撞情形。現場同時實施「鳴哨管制」，以聲響提醒周邊作業人員留意吊裝動態，確保作業範圍安全無虞。藉由事前作業安排規劃，有效降低高風險工序中的潛在危害，使工人能於受控、安全的環境中，順利完成構件定位作業。



圖 14 吊梁施工情形

陸、預鑄工法工程效益探討

相較於傳統現場施工方式，預鑄工法先於工廠預先製作構件，再運至現場進行吊裝組裝。本案帶來的效益涵蓋多個面向，特別是在工期縮短、品質控制、職業安全及環境保護方面，具有顯著效益。

一、大幅縮短工期

統包商在施工前期即導入 BIM 技術，可預先檢討設計階段的介面衝突與潛在問題，降低施工過程中因設計不一致所產生的疑

義與調整時間。透過模型整合與視覺化檢討，可提前釐清設計細節，有效提升施工效率。

在實際施作階段，地下室筏基場鑄施工期間，即同步於工廠進行預鑄構件的生產作業，透過場內外作業並行，大幅壓縮施工時程。此外，將結構系統模組化設計，使構件能以吊裝方式快速定位、組裝，有效簡化現場作業流程。另本案亦整合部分工項以提升作業效率，舉例以外牆預鑄構件於工廠階段即同步施作磁磚飾面與窗框內

崁（詳圖 15），達到多工整合、工序簡化的目標，整體大幅縮短施工週期。

本案每層樓結構體施工約耗時 40 日曆天，相較於鄰近相同規模之變電所工程，每層樓實際施工時間約需 70 至 90 日曆天，預鑄工法可有效縮短近一半工期。現場由

兩個工作面同步施作，每層樓預鑄構件的吊裝作業約耗時 2 週，後續交由鋼筋、模板、水電工班施作。依照現場施工能力，各類構件之每日最大吊裝能量為 20 根柱、大梁與小梁合計 50 根、70 片 KT 板、20 片外牆構件（詳表 1）。



圖 15 貴舍 R/S 一次配電變電所外牆吊裝完成照

表 1 貴舍預鑄構件數量表

	柱	大梁	小梁	KT 板	牆
B1	63				
1F	40	110	105	184	42
2F	40	61	51	122	72
RF	8	66	87	229	84
PF		10	4	18	26
總計	151	247	247	553	224
吊裝能量	20 根 / 天	50 根 / 天	50 根 / 天	70 片 / 天	20 片 / 天

二、施工品質有效控制

預鑄構件於工廠內採用模組化方式生產，具備高度尺寸精度與穩定品質，預鑄廠內廠製動線明確，便於落實品質檢驗與過程監控，搭配標準化製程，有效確保構件尺寸準確、混凝土強度一致，整體品質可控性遠優於傳統場鑄方式。

在現場組裝階段，藉由事前 BIM 模型進行整合設計與施工前檢討，提前排除潛在衝突，降低現場施工錯誤。相較場鑄工法，預鑄施工步驟更為簡化，降低對人力作業之依賴，進一步提升品質穩定性。組裝過程中亦輔以全站儀進行精準定位，確保構件安裝精度。透過科技軟體輔助與精密施工的結合，有品質、低誤差的工程成果，展現預鑄工法於工程中的整合優勢。

三、風險降低確保安全

預鑄工法將現場高風險作業大量移轉至工廠內完成，現場僅進行構件吊裝與接合，現場作業所需人數少且工序單純，有助於安全管理與教育訓練，並大幅降低整體施工時程。

此外，預先計畫吊裝動線與施工順序，現場施工藉由移動起重機與高空作業車取代傳統施工架作業方式，不僅提高作業效率，同時搭配本案設置微型氣象站，對作業環境進行監測及預警，可以大幅降低施工風險，展現預鑄工法於施工防災與職業安全管理上的實質成效。

四、節能減碳與環境保護

預鑄工法透過工廠集中製作作業流程，可重複使用模具，精準控制材料用量，有效提升資源使用效率。同時減少現場模板、鋼筋加工及混凝土澆置等施工程序，大幅降低工地廢棄物產生，並顯著減少現場粉塵與噪音污染，營造更友善的施工環境。相較於傳統場鑄工法，本案預鑄工法可減少碳排放量約 408 公噸（詳表 2）。展現其在環境永續與減碳效益上的顯著成效，亦符合當前工程推動低碳施工的發展方向。

表 2 場鑄與預鑄減少二氧化碳排放量對照表

貴舍一次配電變電所	單位	柱	大梁	小梁	牆	KT 板	總計
構件數量	件	151	247	247	224	553	1,422
混凝土數量	M ³	469.7	839.9	498.0	315.6	407.6	2,530.8
場鑄工法二氧化碳排放量	tCO ₂ -e	574.0	950.1	535.2	213.8	280.3	2,553.4
預鑄工法二氧化碳排放量	tCO ₂ -e	485.0	793.3	457.0	172.4	237.2	2,144.9
二氧化碳排放減量值	tCO ₂ -e	-89.0	-156.8	-78.2	-41.4	-43.1	-408.5
二氧化碳當量減量比例	%	-15.5%	-16.5%	-14.6%	-19.4%	-15.4%	-16.0%

柒、結論

本案為台電首座全面採用預鑄工法建構之變電所，在工程規劃初期，即導入 BIM 技術進行數位整合設計，採用預鑄構件工廠預製及現場吊裝組立方式，大幅縮減工期、降低人力依賴、減少高風險作業暴露。且在預估減少碳排放量約 408 公噸，現場施工有效降低現場施工粉塵、廢棄物與噪音污染，落實綠色施工理念。

整體而言，本工程將預鑄工法與 BIM 數位建築整合應用，不僅因應產業缺工挑戰與職業安全需求，在工期縮減、品質、工安

與環保各面向展現顯著成效。更響應職安署推動「營造四化」的政策方向，對未來後續變電所工程之規劃、設計及施工具有高度參考價值。

參考文獻

1. 葉文凱、陳永成，「預鑄建築工法技術推廣手冊」，內政部建築研究所，臺北，第 21-23 頁（1999）。
2. 「建築物預鑄混凝土結構施工規範」，內政部國土署，臺北（2025）。



國道施工交維實務解析—— 以北外環交流道工程為例

關鍵詞 Keywords

國道 1 號 Sun Yat-sen Freeway

北外環交流道 Tainan Metropolitan Expressway

台灣世曦工程顧問股份有限公司
嘉南工程處

資深協理

張曜洲

經理

李振榮

副理

陳主文

主任

盧志宏

工程師

林昌霖



為因應臺南科學園區成立後引進大量就業人口，有效紓解國道 1 號永康交流道及國道 8 號交通負荷，提供臺南核心地區快速進出國道系統，交通部高速公路局於國道 1 號台南系統交流道與永康交流道間興建北外環交流道，藉由連結北外環道路之匝道工程，強化區域道路串聯，建構完善運輸服務，預計於 2026 年完工後，可紓解永康交流道車潮及增加民眾進出國道之便利性。鑒於本案跨越國道 1 號部分需於夜間國道全封閉進行鋼箱梁吊裝，故就本次施工期間交通維持進行相關實務分享。



壹、工程概要

高速公路局（以下簡稱高公局）於國道1號（以下簡稱國1）台南系統交流道與永康交流道間興建北外環交流道（圖1、圖2），藉由國1連結北外環道路之匝道工程，強化區域道路串聯，建構完善運輸服務，未來完工後可紓解永康交流道車潮，節省20～30分鐘旅運時間，提供安平、

安南、永康及北區民眾進出國道之便利性（詳圖1、圖2）。本工程於2023年9月16日開工，預定2026年12月6日竣工，主要工程包含增設南下及北上各一匝道，並將國1部分路段拓寬為雙向各五車道，透過分散車流、增加道路容量與優化匝道，提升國道服務水準。



圖1 工程位置圖



圖2 工程平面圖

主要工程內容包括：

一、新設北外環道路 L1 及 R1 匝道

(一) L1 匝道 (長度 905m, 橋墩 18 座)
共分為 6 個單元, 除跨越國 1 採鋼箱梁吊裝外, 其餘採場鑄預力箱型梁。

(二) R1 匝道 (長度 616m, 橋墩 14 座)
共分為 4 個單元, 均為場鑄預力箱型梁。

二、拓寬臺南系統交流道南入 (Ramp6) 及北出 (Ramp4) 匝道

(一) Ramp6 匝道採增設 PCI 梁並延伸橋梁懸臂板方式辦理拓寬。

(二) Ramp4 匝道以既有路堤填築方式進行路面拓寬。

三、國 1 主線車道配置調整

配合北外環交流道新建及國道 8 號匝道拓寬, 將既有 3 主線車道及 1 輔助車道調整為 3 主線車道及 2 輔助車道 (316k+000~317k+640)。

四、北外環 RD7 及人行 (自行車) 道施作

配合主體工程重新構築北外環橋下道路, 並設置簡易休憩區。

五、其他配合工程

包括施工便道、施工便橋及構台等假設工程、照明設備工程、周遭景觀工程、交控工程、管線遷移工程及其他各項附屬設施。

六、工程特色

勞動部自 2007 年起, 為提升整體營造施工安全, 推動職業安全衛生優良工程金安獎選拔, 獎勵推動職業安全衛生優良之工程。爰此, 工程團隊導入營建四化, 自規劃設計階段, 實施風險評估、選用安全工法、規劃相關安全衛生設施; 施工階段, 落實安全衛生管理等, 建立完整系統化的職安衛管理機制, 以期施工各階段均具備優質的安全衛生文化, 達到持續減災、零職災的目標。

本工程營建四化具體作為, 臚列如下：

(一) 設計標準化

高架橋樁徑一致 (1.5m)、橋墩尺寸統一。

(二) 構件預鑄化

預製鋼橋 (跨國道段)、跨國道 1 號及鹽水溪排水橋採預鑄 PCI 梁吊裝工法。

(三) 施工機械化

監測模組、機械化施工 (樁機、吊具, 搭載行車視野輔助系統)。

(四) 人員專業化

教育訓練、證照認證、專業分工。

施工過程運用營建四化, 由專業團隊群策群力, 在生態保育、永續經營等面向, 兼顧國道建設的永續發展 (ESG), 縮短南科與臺南市區距離, 提升臺南經濟發展與整體競爭力。

貳、國道施工期間交通維持規劃

本工程主要藉由新設 L1 及 R1 交流道，將臺南市北外環道路連結至國道 1 號高速公路交通路網，其中涉及施工期間需求，辦理國道施工交通維持，以確保國道行車安全，分期規劃程序如下：

一、L1P15、L1P16 橋墩工程

為新設 L1 匝道跨越國道 1 號路段，需於國道兩側設立擋土設施後打除部分擋土牆以進行橋墩工程，故需長期封閉國道 1 號部分外路肩，屬於長期性施工。

二、跨國道 1 號鋼箱梁吊裝工程

為符合不在國道 1 號中央落墩的目標，本工程採用鋼箱梁連接國道 1 號東西兩側橋梁，在鋼箱梁吊裝期間，須於國道 1 號辦理全線或北上（南下）段交維封閉，屬於中期性施工。

三、Ramp4、Ramp6 匝道拓寬工程為進行

Ramp4 匝道拓寬需封閉 Ramp4 匝道部分外路肩，以進行路肩底層改善工程；另為進行 Ramp6 匝道拓寬，需進行兩階段封閉左右兩側匝道路肩，以進行新設 PCI 梁吊裝作業，兩者皆屬於長期性施工。

四、國道 1 號路面刨鋪工程

於上述工程完成後，將在本工程範圍內進行路面 AC 刨鋪及標線重繪工程，預計採半封閉半開放方式，屬於中期性施工。

上述所提各項工程於道路施工前，需依照高速公路局工程標準作業程序局 11080 流程（詳圖 3）辦理相關交通維持計畫提送，並在施工前依照高速公路局封閉主線施工宣導作業規定（詳圖 4），於施工前 10 日完成交通維持計畫核可，並於施工前 7 日發送新聞稿及完成局網公告，另於施工前 5 日完成警廣宣導、預告牌面布設及 CMS 顯示。上述工程所需封閉時間屬於中至長期性施工，需依據高速公路局施工之交通管制守則內有關中、長期性施工之規定。



局流程 11080

版本：7 (113.12)

程序局 11080 施工之交通管制措施管理作業

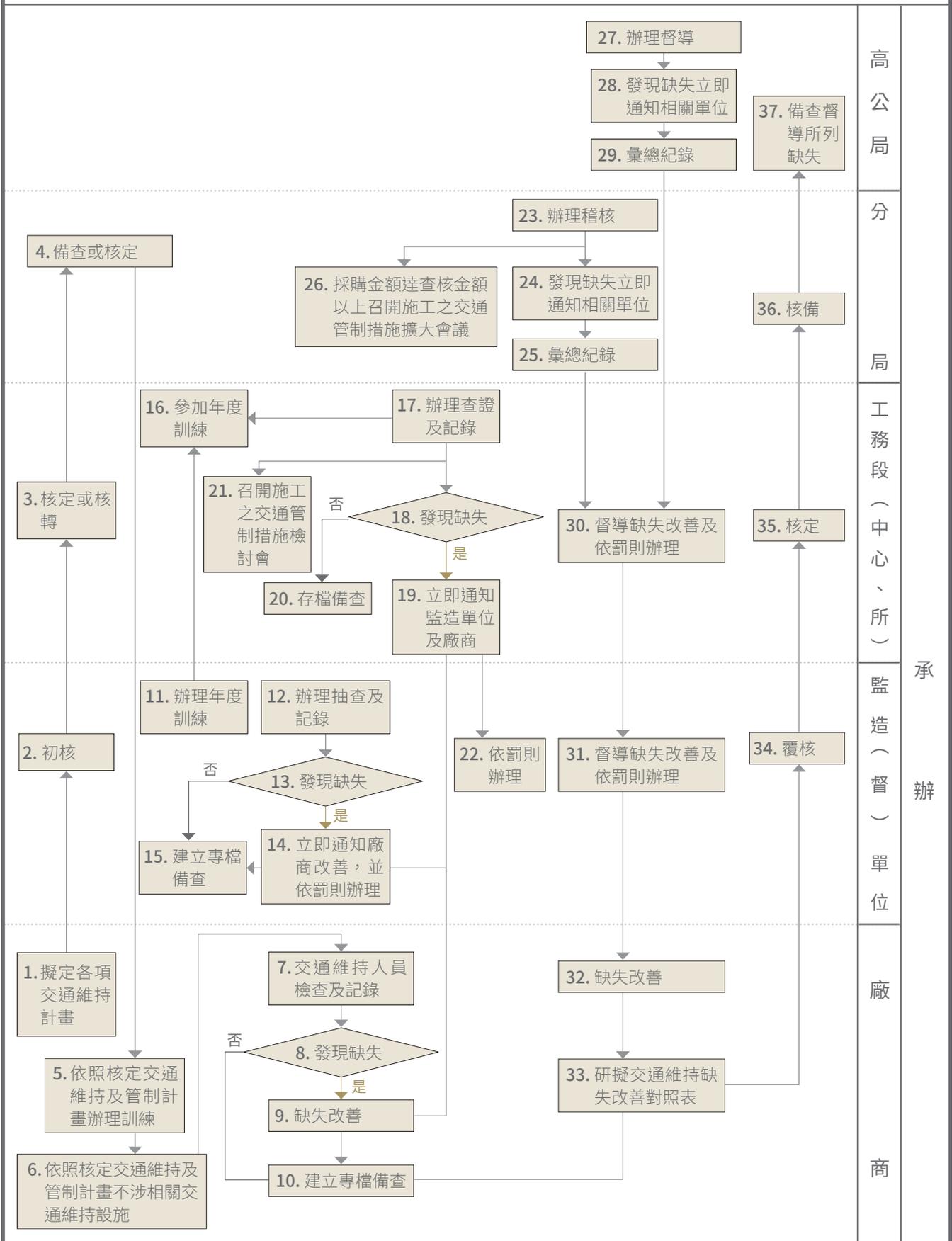


圖 3 局程序 11080 流程圖

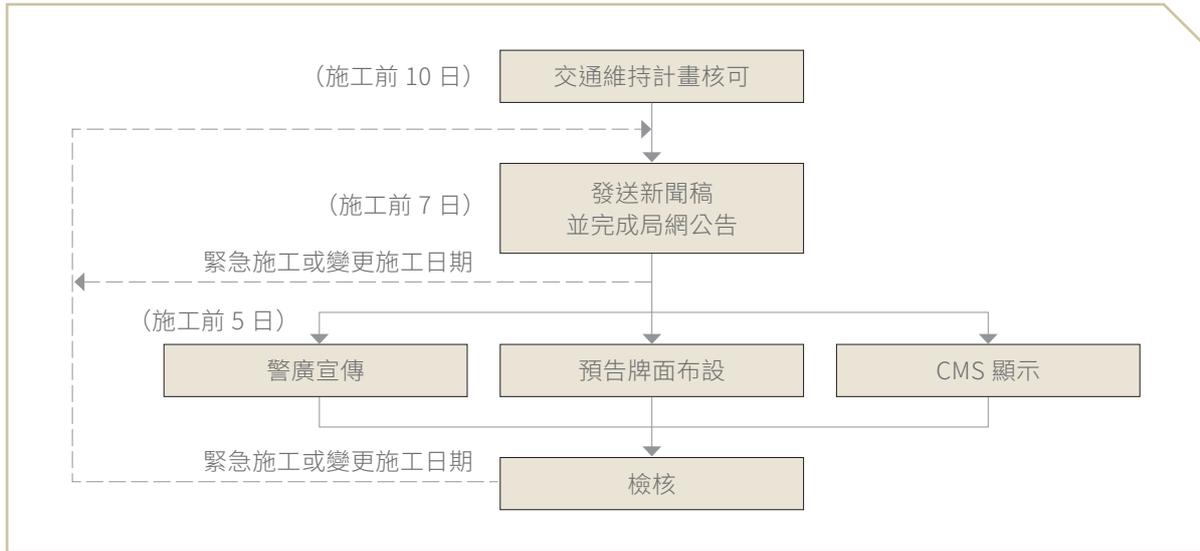


圖 4 高速公路封閉主線施工宣導作業規定流程圖

參、跨國道段夜間鋼箱梁吊裝交維封閉作業

本工程跨國道段鋼箱梁吊裝作業，於 2025 年 6 月 30 日辦理第一次交維封閉，將鋼箱梁成品吊運至工區內，並於 2025 年 7 月 1

日、7 月 8 日及 7 月 9 日分階段進行夜間鋼箱梁吊裝作業，作業前，依據上述所提相關宣導作業規定，於 7 日前發布新聞稿（詳圖 5），並於 5 日前辦理預告牌面布設（詳圖 6）。

交通部高速公路局第二新建工程分局

新聞資料

發布日期：114 年 6 月 27 日
 編號：
 為辦理國道 1 號北外環交流道工程(第 1105S 標)之 LIU5 鋼箱 A09-A11/B09-B11 單元吊裝作業，預計於 114 年 7 月 8 日(星期二)夜間 21:00 至翌日 06:00 止，封閉國道 1 號雙向全線(南下及北上)永康交流道(319K)至臺南系統交流道(315K)路段。

一、交通維持管制時段、路段如下：
 114 年 7 月 8 日(星期二)夜間 21:00 至翌日 06:00 止，全封閉國道 1 號雙向全線(南下及北上)永康交流道(319K)至臺南系統交流道(315K)。

二、交通管制期間建議替代路線：

(一) 北上用路人：

1. 國 1 主線北上車輛下永康交流道路線替代路線：
 下交流道往新市方向→接台 1 線(中正北路)→左轉新港社大道→上國道 8 號往西行→轉國道 1 號往北。
2. 平面道路往國 1 北上車輛替代路線：透過台 10、台 1、台 39 由國 8 台南系統→進入國 1/3 往北
 台 19 線(安和路)往北→右轉長和路→左轉和濟路→右轉安吉路接國道 8 號→轉國道 1 號往北
 台 1 線(中正南路)往直行→左轉仁愛街→左轉永安路→右轉上北外環高架道路→左轉南科聯路→右轉新港社大道→上國道 8 號往西行→轉國道 1 號往北。
 台 39 線(高鐵橋下道路臺南段)往北/台 1 線(中正南路)往西南→轉新港社大道→上國道 8 號往西行→轉國道 1 號往北。

(二) 南下用路人：

1. 國 1 主線北上車輛下臺南系統交流道路線替代路線：
 下交流道往新市方向(東)→接新港社大道→右轉中正北路→上永康系統交流道往南。
 或下交流道往安南方向(西)→走外側平面台 17 甲→於國道橋下迴轉迴轉

圖 5 高速公路交維封閉新聞稿



圖 6 預告牌面布設

施工前於線上完成施工封閉進場通報後，立即會同國道警察進行國道全線封閉，並配合義交人員及交維車輛管制匝道入口

(詳圖 7)，同時依據交維計畫內之交維設施圖完成交維設施布設後，正式開始鋼箱梁吊裝作業 (詳圖 8)。

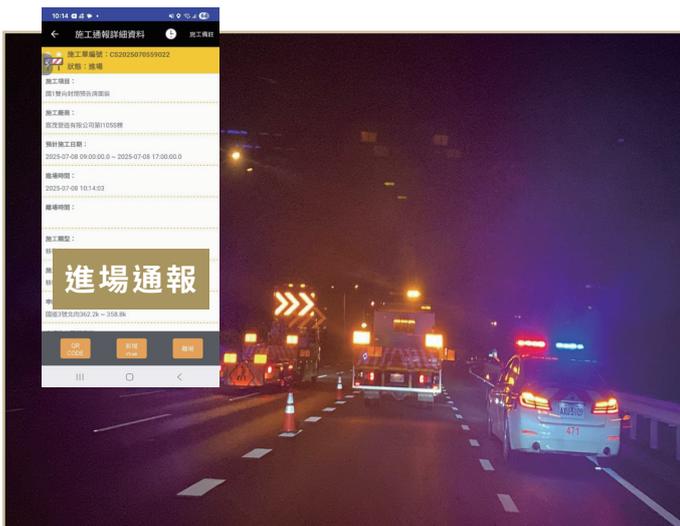


圖 7 配合國道警察進行全線封閉



圖 8 鋼箱梁吊裝作業

待鋼箱梁吊裝完成後，進行現場環境清潔及交維設施撤收 (詳圖 9)，所有工作需於

翌日 6 點前於線上完成施工封閉離場通報 (詳圖 10)。



圖 9 現場環境清潔、交維設施撤收



圖 10 鋼箱梁吊裝完成

肆、Ramp4、Ramp6 匝道拓寬作業

本工程為緩解上下班時間臺南系統交流道長期雍塞情形，配合調整新設 L1 及 R1 匝道至臺南系統交流道之間車道，由原 3 車道及 1 輔助車道調整為 3 車道及 2 輔助車道，為配合上述調整，連帶進行 Ramp4、Ramp6 匝道拓寬作業，以下就兩匝道拓寬作業說明如下：

一、Ramp4 匝道拓寬作業

臺南系統交流道 Ramp4 匝道為國道 1 號北上銜接國道 8 號東行往南科方向之重要匝道(詳圖 11)，近年來因南科園區蓬勃發展引進大量工作機會，受限於國 1 北上銜接國 8 匝道除原 3 車道外，僅設 1 輔助車道，故每

逢上班時間易造成嚴重車流回堵，本工程將 Ramp4 匝道拓寬後，配合國 1 主線車道寬道調整後，可使該銜接交流道變更為 2 輔助車道，並延長車流乘載距離約 1km。

工程原設計於國道 1 號主線至 Ramp4 匝國外側進行 1,150m 的路肩路基底層改善工程，考量施工期間對交通影響甚大，監造單位於工程開工後，協調廠商至改善範圍內進行現地鋪面鑽心(詳圖 12)，確認原國道鋪築厚度，提供予設計單位評估確認與主線一致，符合設計原意；因此，於本次拓寬作業期間，將原有 1,150m 路肩底層改善工程縮短為 124m (詳圖 13)，除了可以減少於國 1 主線上施工時間、節約不必要之工程費用，另外也可減少於高速公路上封閉外側車道及路肩施工所產生之風險，大幅提升國道行車及施工之安全性。



圖 11 Ramp4 匝道



圖 12 國道現地鋪面鑽心



圖 13 原設計底層補強範圍與變更後底層補強範圍

二、Ramp6 匝道拓寬作業

臺南系統交流道 Ramp6 匝道主要作為國道 8 號西行銜接國道 1 號南下之匝道，為南科園區通往臺南及高雄之重要聯絡匝道（詳圖 14），鑒於 Ramp6 及 Ramp1 匝道於鹽水溪排水橋上交匯成 1 線道，導致 Ramp6 於下班時間常年回堵至國道 8 號，故本工程配合拓寬 Ramp6 時，於跨鹽水溪排水橋段及國道 1 號南下臺南系統交流道至新設 R1 匝道區段，將原 1 輔助車道調整為 2 輔助車道，並可維持輔助車道長約 1km，能有效增加車流承載量，減少車輛由 Ramp6 回堵至國道 8 號之機率。



圖 14 Ramp6 匝道跨鹽水溪排水橋段

受限於 Ramp6 為重要匝道，且跨鹽水溪排水橋段為單車道，故於施工期間應盡量減少對交通之影響，工程施工期間採二階段施工：第一階段採用車道往西偏移，先行

拓寬東側橋面，第二階段採用車道往東偏移，並拓寬西側橋面，於車道偏移期間，仍維持車道寬度 3.5m，以避免影響該處車輛行駛安全（詳圖 15）。

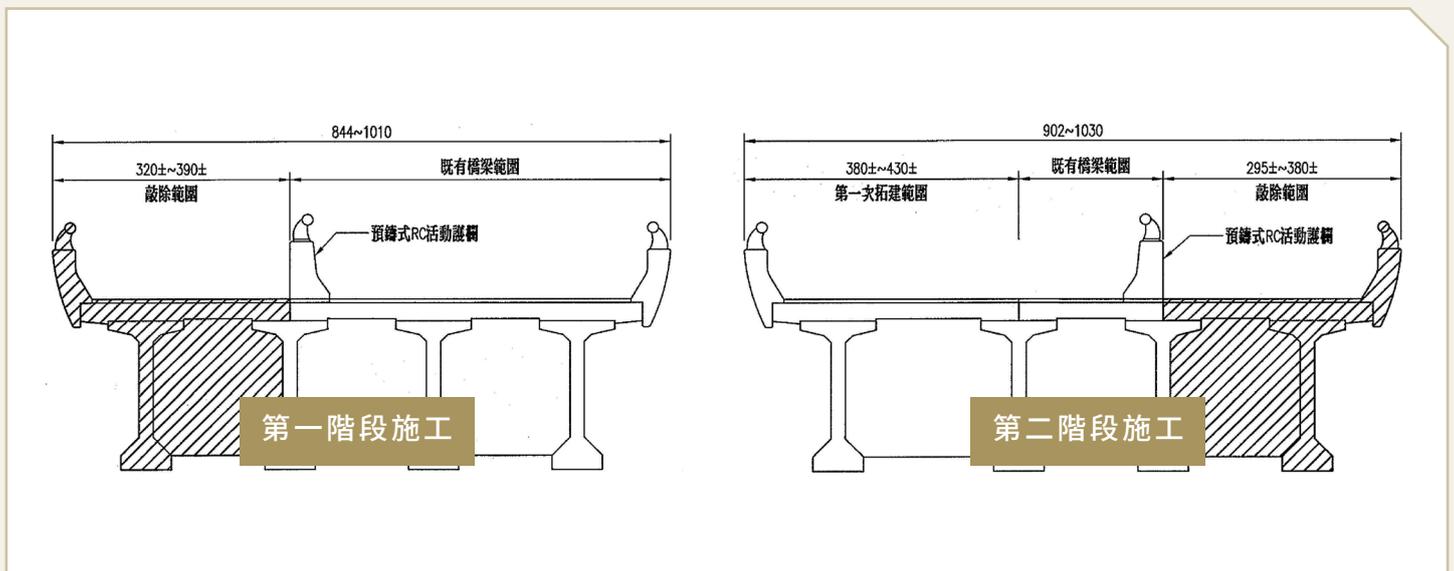


圖 15 Ramp6 匝道分二階段拓寬

本工程 Ramp6 匝道拓寬工程依據交通部高速公路局施工之交通管制守則屬於長期性施工，依據相關規定需設置前置警示區段 300m 及前漸變區段 30m，考量 Ramp6 及 Ramp1 車道匯流長度短，且 Ramp6 於施工路段為大轉彎加下坡段，視線不佳且車

速普遍偏快，故於該段工程開始前，於所提送交通維持計畫內加長前置警示區段達 400m 及前漸變區段達 90m，以提高駕駛人應變反應時間，減少車輛碰撞交維設施可能性（詳圖 16）。

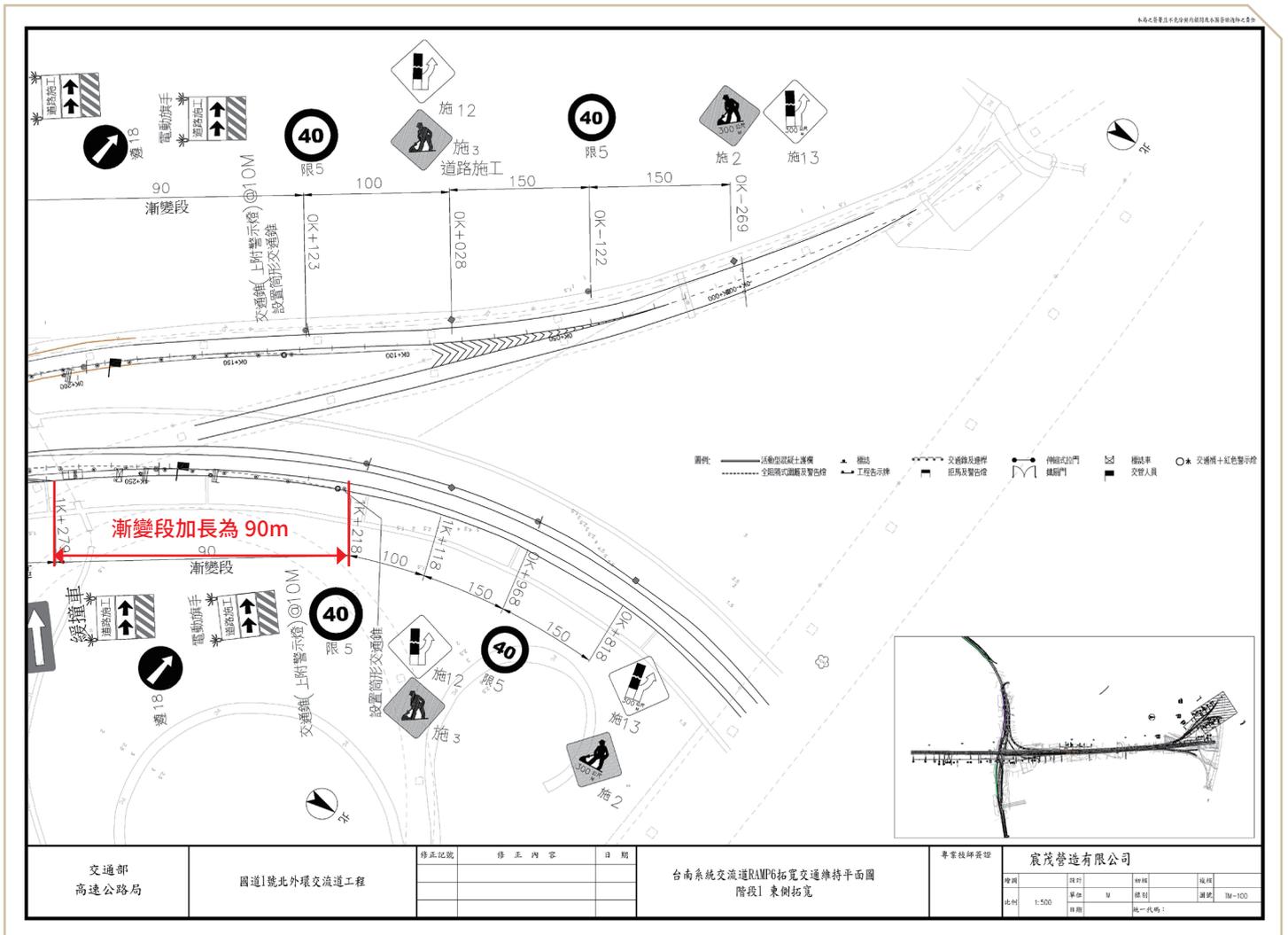


圖 16 Ramp6 匝道交維漸變段加長

伍、結語

本工程藉由新設 L1、R1 匝道工程，作為連結臺南市北外環道路至國道 1 號的最後一哩路，工程配合拓寬 Ramp4、Ramp6 匝道及國道 1 號主線，預期將有效改善臺南系統交流道往南科方向上下班時段車流壅塞情形，並藉由北外環道路減輕永康交流道長期車流超負荷情況，建立臺南市 4 橫 3 縱高快速路網韌性。

其中所遭遇最大困難，主要為與國道 1 號之施工銜接介面，尤其永康交流道至臺南系統交流道間，因上下班時間車行流量大且易壅塞，工程期間於該路段進行匝道銜接及匝道拓寬，就有如穿著衣服改衣服，需保障於施工期間不影響車流，如因地制宜藉由減少於國道上設置交維設施之時間（鋪面鑽心減少底層改善範圍），或依現況調整延長交維設施設置距離（位於匝道轉彎且下坡段）等工程規劃，在確定施工安全無虞之下，確保用路人之行車安全與順暢。

雖本次工程僅增設北外環東行至國道 1 號北上匝道（L1 匝道），及國道 1 號南下至北外環西行匝道（R1 匝道），同時也先行調整新設匝道段至臺南系統交流道間之國道 1 號車道數量，為後續可能之其它匝道增設作業基礎，並奠定後續增設其它匝道之可行性，以完善北外環快速道路與國道 1 號之連結，增加北外環道路便利性，並完善大臺南市 4 橫 3 縱之高快速路網，提供市民更便捷順暢之交通網絡。

參考文獻

1. 交通部高速公路局，「橋梁耐震補強設計注意事項」，第 3-43 頁（2024.4.1）。
2. 交通部高速公路局，「高速公路封閉主線施工宣導作業規定」，第 5 頁（2024.5.6）。
3. 交通部高速公路局，「施工之交通管制守則」，第 47-59 頁（2023.1.19）。

建構 AIoT 實證場域—— 以亞灣智慧公宅 新建統包工程為例

關鍵詞 Keywords

人工智慧物聯網 5G AIoT

AI 工程應用 AI Engineering Applications

智慧社宅 Smart Social Housing

台灣世曦工程顧問股份有限公司
高雄工程處

協理

蔡同宏

業務經理

洪偉傑

副理

沈岑駿

專案副理

蔡濬宇

工地主任

陳壯梁

工程師

鄒宜叡



本文旨在探討高雄亞灣智慧公宅（第一期）作為智慧社宅 AIoT 創新應用的示範基地。本工程以新建統包方式推動，結合 BIM 技術確保管線及設備整合順暢，並採用標準化數據治理與資訊安全措施，保障系統穩定與資料隱私。實證場域涵蓋住宅內部智慧應用與社區公共空間服務，強化居民安全監控與健康照護，並提供智慧門禁、人流管理與共享設施預約等功能。系統透過 API 開放多廠牌互通，支援後續擴充與創新應用。

透過能耗分析及維運 KPI 評估，驗證智慧系統於節能減碳與運維效率的顯著效益。亞灣智慧公宅（第一期）成功示範 AIoT 技術於社會住宅的全面應用，實現綠色永續、生活便利及全齡友善的智慧居住環境，具備複製推廣價值，為台灣智慧城市及社會住宅發展提供寶貴經驗與技術革新。



壹、前言及工程概述

近年臺灣營建產業面臨人力短缺問題嚴重，面臨少子化及其他產業人才需求高度競爭，為了更有效率提升工程管理效能，兼具施工品質與進度控管，乃當前營建產業亟需解決的核心課題。建築全生命週期之智慧化，有助減少從設計到施工乃至營運管理之人力之需求。

「前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」是由高雄市政府都市發展局主辦，基地位於高雄市前鎮區亞洲新灣區計畫之核心地帶，為市府推動都市創新與社會住宅政策之重要指標性建案。基地面積約 8,960 平方公尺，建築總樓地板面積約 58,657.08 平方公尺，規模為地上 14 層、地下 2 層，一幢 4 棟，規劃住宅 634 戶與商業空間 9 戶，共計 643 戶，建築設計具綠建築、智慧建築、耐震構造及通用設計等多項性能指標。

本案於設計與施工階段即同步導入智慧工地科技系統，實現施工資訊即時化、風險預警自動化與管理流程數位化。

貳、智慧工程實證項目

為落實智慧工地科技應用，「亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」於初期規劃階段，即預先導入多項智慧工地科技，涵蓋 AIoT 智慧工地系統、AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台、AIoT 雲端管理系統 - 自動化安全監測、智慧周界安全圍籬、AI 人員臉部辨識系統、智慧洗車台 - 車輛管制系統、AIoT- 智慧環境監控系統、施工架監測預警系統 - 無線壁連桿等等智慧科技應用。本案亦規劃智慧停車、智慧關懷、智慧安全、智慧物管、智慧資訊、智慧展示、智慧節能、智慧三錶、智慧統計等智慧管理系統。

一、AIoT 智慧化工地系統平台

本案之統包團隊因應機關及契約需求，偕同中興保全科技股份有限公司和銘祥科技實業股份有限公司合作，開發 AIoT 科技智慧化營建工地管理平台，整合各項 AI 系統於「智慧工地管理平台」中，平台具備儀表板功能，可即時呈現潮汐資訊、所有文件送審狀態、現場總人數、現場車輛總數、人員異常總數、環境監控警示超標次數、工地安全告警等功能，使工地管理實現全方位資訊可視化與數據化。

(一) AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台

工地管理者可一覽所有 AI 系統監控結果，並自動產出每日巡檢報告與工作者出勤紀錄。相較過往由紙本手寫紀錄、Excel 彙整，資訊整合時間從每日約 2 小時降至 30 分鐘以內，亦有助於後續監造單位、專案管理單位或業主查核透明度。設置上下設備安全語音、新式防止漏電檢驗、人臉辨識、電箱自動偵測滅火系統、設置安衛監控中心及各項安全設施建置等使本工程能達預期安全成效及善盡保護工作者責任，避免危害發生。

(二) AIoT 雲端管理系統——自動化安全監測

本工程為確保工區與施工影響範圍內之建築物於施工期間之安全，於工區與施工影響範圍內規劃佈設適當之監測儀器，確實掌控施工期間安全，並降低工作者在危險場所收測數值，現場自動化監測站設備有水位觀測井、電子水壓計 (ELP) 及支撐應變計等三項，連接 4G 自動化集錄器，經由網際網路傳送到手機 APP 監看、工務所顯示平台或專屬網頁，現場自動化安全監測

與雲端系統架構，有助於後續監造單位、專案管理單位或業主查核透明度。

(三) 智慧周界安全圍籬

本工程採用中興保全科技股份有限公司所建置之智慧型周界安全圍籬系統，進行工地周界防護與監控管理。系統具備全天候影像監控與入侵偵測功能，能即時辨識可疑入侵行為，並透過警報系統即時通知現場管理人員。整合視訊監控與智慧判斷技術，提供施工區域全面性之安全防護，有效降低非授權人員進入風險，強化工區安全防線。

(四) AI 人員臉部辨識系統

為強化工地出入管理與提升安全管控效能，本工程由職安組建置完整之作業人員人臉資料庫，並導入 AI 人臉辨識技術執行出入口身分驗證作業。系統能針對所有進出工區人員即時辨識與紀錄，取代傳統人工現場查看作業與感應裝置，大幅提升進出控管之精確性與效率，並有效防堵非授權人員進入施工區域，每天收工後再次檢查 AI 人員臉部辨識系統是否遺留人員未出工地，達成預防性風險管理目標。

(五) 智慧洗車台——車輛管制系統

鑑於營建工程常見施工車輛駛出工區後造成週邊道路污染之情形，易引發環保單位開罰及民眾陳情爭議，本工地特於大門內側設置智慧洗車台，結合車輛識別與時間管控機制，以加強污染預防管理。系統設定車輛須於洗車平台停留 30 秒以上始得離場，大門上設置號誌燈供司機辨識，若於規定時間內提前駛離，設置於大門上方之 CCTV 將即時拍攝車牌影像，並透過 LINE

推播功能通知工地管理者。管理者將依系統紀錄立即開立警告單予該承攬廠商，並持續追蹤其後續是否涉及污染道路情形，以落實車輛出入管理與環境保護目標。

(六) AIoT ——智慧環境監控系統

承商與銘祥科技實業股份有限公司合作建置 AIoT 智慧環境監控系統，於工地 AI 貨櫃外側設置溫度、濕度與空氣品質等多項感測模組，進行施工環境即時監測。該系統透過雲端整合平台連結周界安全圍籬與 AIoT 物聯網架構，可自動驅動相應之環境防護設施（如抑塵、降溫或警示裝置），依即時監測數值進行調節控制。此智慧化監控機制有助於降低施工對鄰近環境之衝擊，並強化工區綜合環境品質管理效能，相關監測統計數據及分析可作為後續施工期間的環境防護作為。

(七) 施工架監測預警系統——無線壁連桿

墜落、倒崩塌、物體飛落是施工架最常見的幾種災害類型。本工地為強化高架作業之結構穩定與風險預防，於施工架關鍵連接處設置「無線壁連桿感知器」，透過無線通訊方式連接至雲端安全監控平台，即時監測壁連桿之連接狀態與結構穩定性。系統具備異常預警功能，當數值異常時可立即推播至管理人員手機 APP，進行即時通報與處置，有效達成預警管理與倒塌事故之預防。

二、導入多項成效分析

本工地導入多項 AIoT 與智慧工地科技，針對施工安全、人員管理、施工品質、環境維護與資料整合等面向，皆展現出明顯成效，具體分析如下：

(一) 安全監控效率提升

透過 AI 人臉辨識系統及電子圍籬等措施，工地出入控管與周界安全防護顯著強化。每日出入人員皆須經過 AI 驗證與即時紀錄，有效杜絕未授權人員進入，並透過 LINE 推播機制即時預警異常事件，提升現場反應速度。施工架感知系統亦成功辨識結構異常狀況，達成預防性警示目的。

(二) 勞動管理精準化

導入 AI 系統後，工作者進出資料皆由系統自動判讀與紀錄，出勤資訊每日自動彙整，減少人工紀錄與比對時間約 75% 以上。人員異常（如遲到、未刷退）皆即時告警並回報，增進人員管理準確性。並應用 ChatGPT 即時翻譯，協助 44 位越南籍移工順暢溝通，顯著改善團隊合作與效率。

(三) 施工品質與風險預防同步提升

自動化安全監測系統（含水位、支撐應變、水壓力等感測）可即時監控結構周邊變化，透過 APP 與監控平台同步更新資料，提升風險反應即時性。由原本每週監測改為全天候即時掌握，有助減少潛在危害發生率。

(四) 環境污染事件有效抑制

智慧洗車台與空氣品質監控聯動塔吊或施工圍籬噴霧系統，降低道路污染與揚塵風險。針對車輛提前離場之違規情形，即時拍攝並回報，開立警告單件數明顯減少，周邊居民陳情案件亦大幅下降，顯示環境友善度提升。

(五) 資訊整合與管理透明化

透過智慧工地管理平台，各類監測資料

（人員、車輛、環境、告警）皆可即時匯總於儀表板，並自動產出巡檢日報。過去每日需 2 小時人工彙整資料，現今僅需 30 分鐘內即可完成，亦有助於監造單位或業主即時查核與決策支援。

參、A I 人工智慧於本工程的實務應用

一、A I 影像查驗協助分析

使用 ChatGPT 4o Plus 版，導入 AI 技術協助亞灣工地多項管理作業，並加快問題通報流程及提升現場掌握度，透過手機拍照即時分析，詳圖 1。



圖 1 以 AI 協助現場分析畫面截圖

二、使用 ChatGPT 5.0 進行每日工作績效分析

分析項目包括工期進度、人力數據分析、績效及施工建議，詳圖 2。

三、UAV 無人航空載具空拍圖資 + ChatGPT 5.0 影像辨識施工進度

透過定期工區空拍結合 AI 深度影像辨識分析，強化監造及統包商工地管控作為，詳圖 3。



圖 2 以 AI 進行各類分析畫面截圖



圖 3 以空拍結合 AI 辨識施工進度畫面截圖

四、AIoT 科技智慧化營建工地配置

設置包括 AI 人員臉部辨識系統、智慧周界安全圍籬、智慧工地車輛管制系統、AIoT

智慧環境監控系統、AIoT 塔吊傾斜角度預警系統、戰情中心，詳圖 4。



圖 4 AIoT 相關應用於工地之配置圖

五、AIoT 智慧工地系統平台

可顯示監控氣溫、相對濕度、噪音分貝數、熱指數、細懸浮微粒 PM2.5 濃度、灑水器觸發判斷、警示燈觸發判斷、即時及

累積耗電量、即時電流、水流量（噴霧累積流量及生態池累積流量）、生態池水下監視器、熱危害級數、生態池水質水位監測、灑水及警示燈控制、水霧炮機控制、停車場環境監視器等多元功能，詳圖 5。



圖 5 AI 智慧工地系統畫面截圖

六、AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台

系統可彙整施工廠商、工種、出工人數、現場負責人、職安人員、作業主管等項

目，更可佈達安衛政策、工安守則、宣導事項於各顯示載體，詳圖 6。

永青營造雲端平台
Supervise and Control System

職業安全衛生告示牌
星期一 2025/06/16 09:53:47

工程名稱： 前鎮亞灣智慧公宅(第一期)新建統包工程

承包廠商

永青營造工程股份有限公司

工地負責人：
陳桓宇

職安負責人：
鄭宏勇

監造

CECI、閻康

安衛政策

預防工安事故，確保人員安全
維護施工環境安全，降低職災與污染
提升員工安全知識與應變能力，建立安全文化

十大工安守則

1. 作業前安全確認
2. 個人防護裝備佩戴
3. 機具設備安全操作
4. 高架作業防止墜落
5. 現場設置消防設備
6. 施工保持現場整潔
7. 施工控制噪音污染
8. 現場避免施工揚塵
9. 緊急應變與通報機制
10. 現場應避免危險行為

安衛衛生宣導事項

施工前務必進行風險評估確保工人了解安全措施。
現場作業時必須穿戴頭盔、安全帶等必需的安全裝備。
施工機具需定期檢查保養確保運行正常。
高處作業要安裝防護欄杆使用安全繩索等防護設施。
施工現場必須備有足夠的消防器材並進行定期檢查。
現場應保持整潔避免雜物堆積減少絆倒與滑倒的風險。
施工過程中注意施工時間與設備選擇減少噪音污染。
工地周圍要設置圍欄並定期灑水防止塵土飛揚。
定期進行防汛演練確保員工了解工地應急處理程序。
禁止在施工現場從事任何危險動作嚴禁酒後作業。

零災害紀錄表

自 2022 年 10 月 12 日 至 2025 年 06 月 16 日

連續零重大職災日數	978 天
距上次重大職災日數	--- 天

安全主題

- 防止登革熱
- 防止高溫作業
- 注意吊掛作業

每日出工人數	男：30	女：9	移工：28
--------	------	-----	-------

施工廠商	工種	出工人數	現場負責人	職安人員	作業主管	施工廠商	工種	出工人數	現場負責人	職安人員	作業主管
品盛	鋼筋	24	廖益泉	陳佳惠		廣金	塔吊	2	藍建東	鄭孟嘉	
初遠	模板	21	顏義軒		陳俊鴻	貝展	油漆		邱詠元		
旭錄	臨時水電	12	文光謙								
玖太	泥作	3	林正峰	楊宜蓉							
遠菱	水電	29	張智傑	洪梓銘							
鼎如	施工架		林嘉賢	陳玟翰	林嘉賢	好爭多，三岳	點工	5			

圖 6 AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台畫面截圖

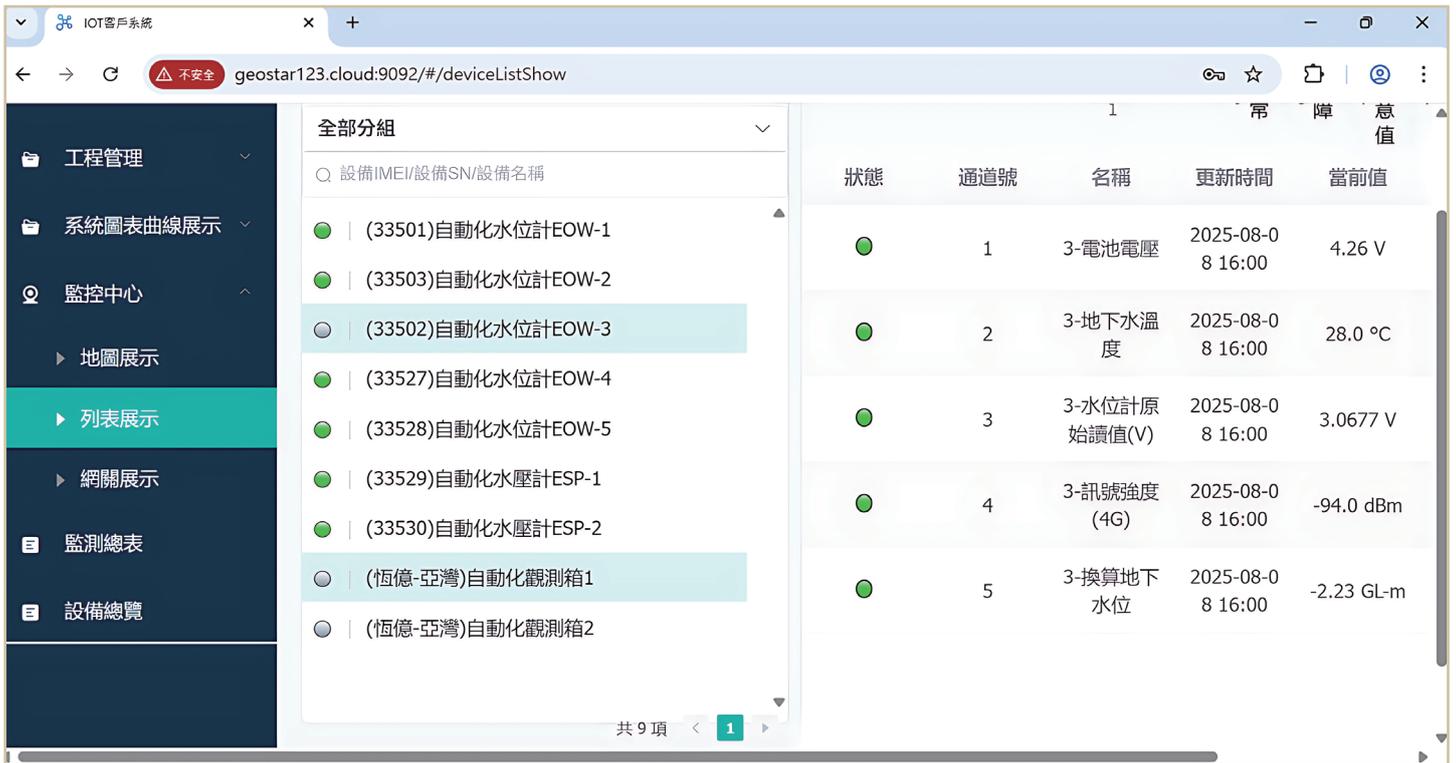
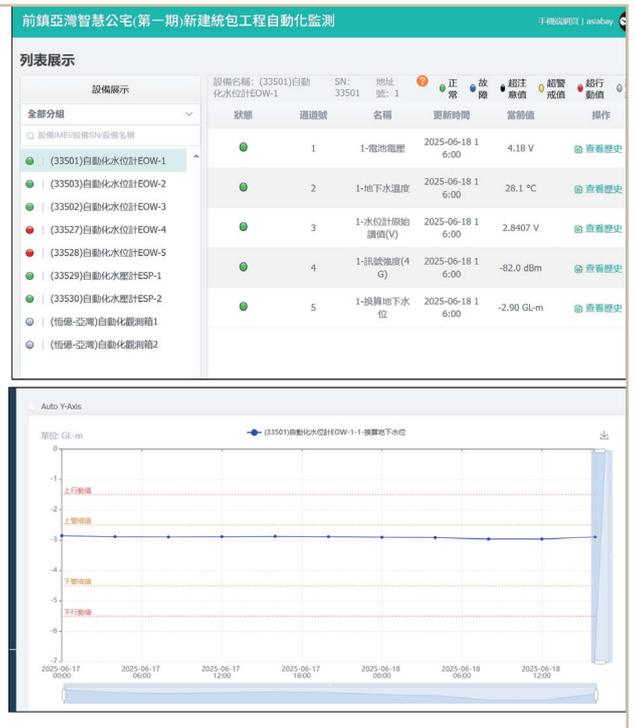
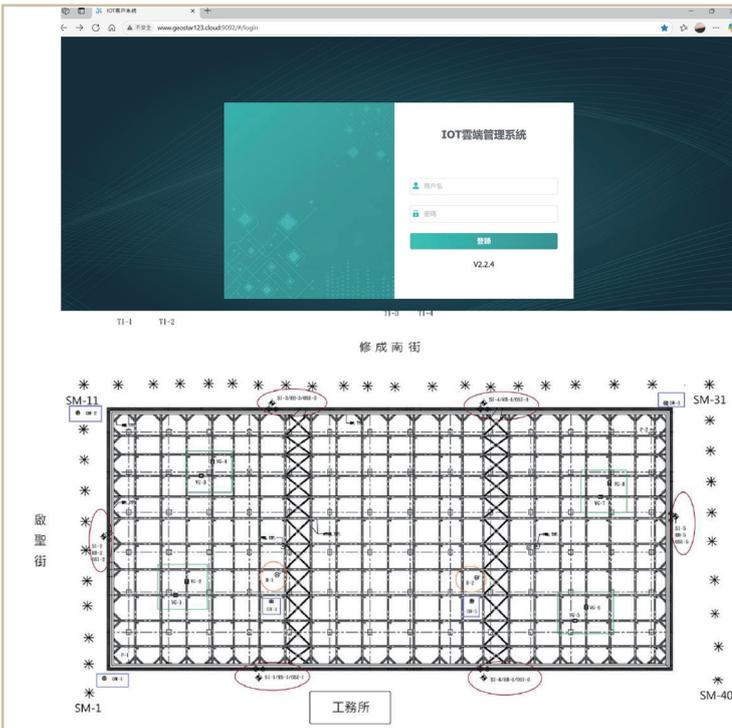


七、AIoT 雲端管理系統——自動化安全監測

系統監測項目包括自動地下水位計、自動地下水壓計、自動觀測箱等，詳圖 7。

八、智慧圍籬自動灑水系統

透過空氣品質感知器連動雲端平台 AI 自動判斷是否啟動噴霧灑水降低懸浮微粒，詳圖 8。



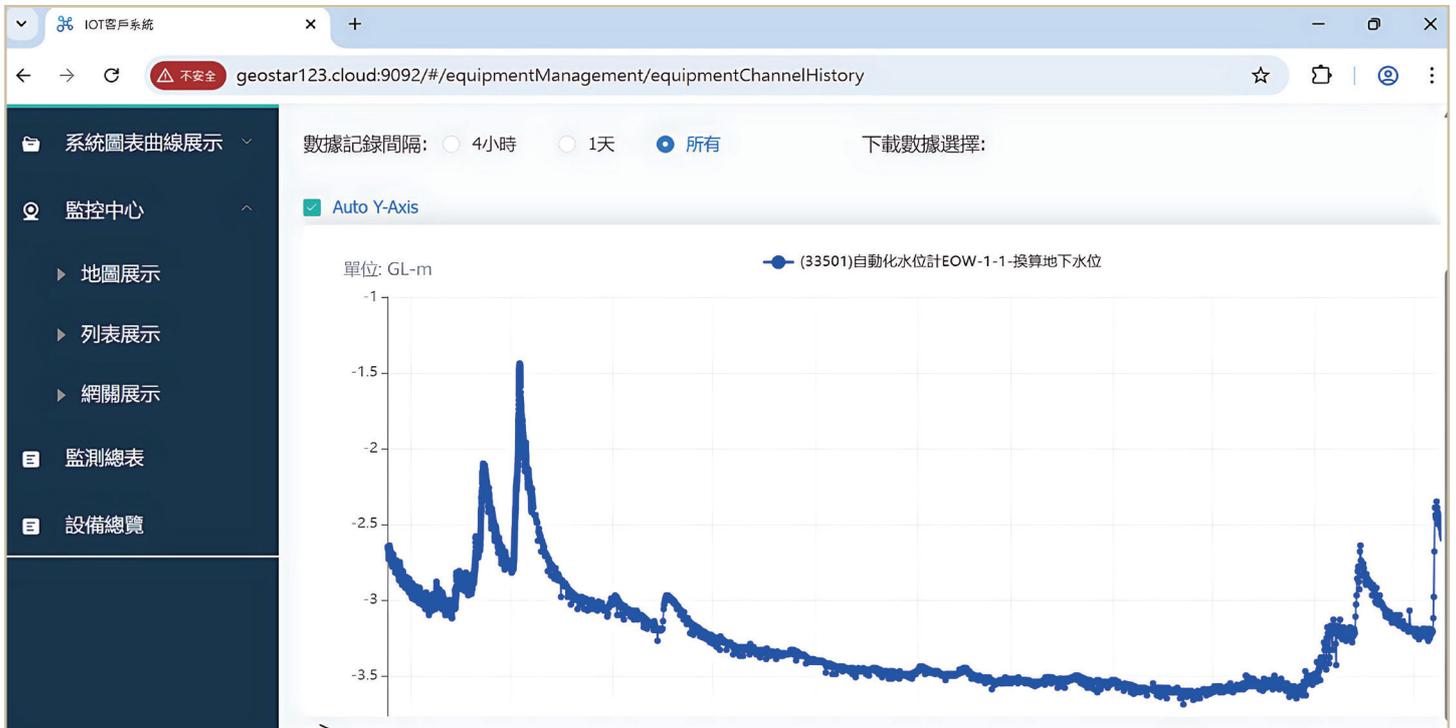


圖 7 AIoT 雲端管理系統 - 自動化安全監測畫面截圖



圖 8 智慧圍籬自動灑水系統

九、AIoT 智慧洗車台——車輛管制系統

透過建置智慧物聯網洗車台系統，使工地現場管控進出重車清潔情形，大大降低對周邊道路環境污染情形，詳圖 9。

十、AIoT 塔吊灑水噴霧設備——降溫、降揚塵兼澆置混凝土後灑水養護

透過建置 AIoT 塔吊灑水噴霧設備，達到工地降溫、降塵兼具澆置混凝土後灑水養護功能，詳圖 10。



圖 9 AIoT 智慧洗車台——車輛管制系統運作圖



圖 10 AIoT 塔吊灑水噴霧設備圖

十一、AIoT 施工架監測預警系統

本施工架監測系統包含感測器部署、數據收集、預警通知功能，詳圖 11。



圖 11 AIoT 施工架監測預警系統圖

十二、AIoT 塔吊傾斜角度預警系統

本系統包含實時監測傾斜度之角度感測、超出安全範圍警報之預警機制、塔吊事故之預防，詳圖 12。



圖 12 AIoT 塔吊傾斜角度預警系統圖

十三、AIoT 智慧熱危害警報系統

本系統包含溫度監測、熱指數計算、預警機制、工人熱危害保護等功能，詳圖 13。

肆、智慧生活規畫項目

本案將落實智慧便利生活場域，其項目如下：

一、智慧停車場

後續停車場委外 OT 廠商可透過建置掃描二維條碼進入即時車位狀態，乃至方向指引、停車費線上支付達成智慧停車，詳圖 14。

二、智慧關懷系統

可擴充建置高齡及不便者進出統計、住宅浴廁緊急求助鈕、銀髮族生活動態監測，增進社區便利性及安全性，詳圖 15。



圖 13 AIoT 智慧熱危害警報系統圖



圖 14 AIoT 智慧停車場 AI 生成概念示意圖

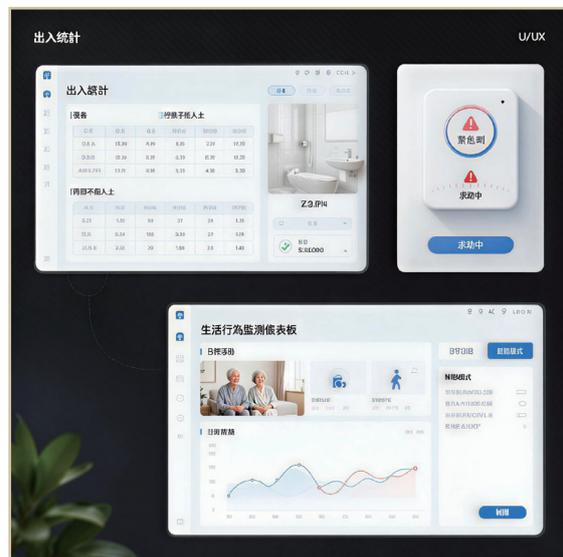


圖 15 AIoT 智慧關懷系統 AI 生成概念示意圖

三、智慧安全系統

透過整合智慧安全系統進行門禁管制、屋頂露臺防墜警示、社區影像監控系統，以智慧科技達成輔助減省管理人力之功效，詳圖 16。



圖 16 AIoT 智慧安全系統 AI 生成概念示意圖

四、智慧物業管理系統

多媒體社區佈告欄、天氣空氣品質等住戶端物業管理平台，可提供跨裝置乃至智慧型手機 APP 使用，詳圖 17。



圖 17 AIoT 智慧物業管理系統 AI 生成概念示意圖

五、智慧展示空間

本案統包需求書即載明需設置智慧展示空間（5G AIoT 展示場域、智慧零售體驗），建築完成時此空間，詳圖 18，將作為最先進的 5G 及人工智慧物聯網相關科技的體驗零售場所。



圖 18 本案 AIoT 智慧展示空間模擬圖

六、智慧節能系統

建置智慧節能系統包含雨水回收澆灌、公區照明及空調控制、公共用電管理系統，詳圖 19，以符合 ESG、SDGs 目標。

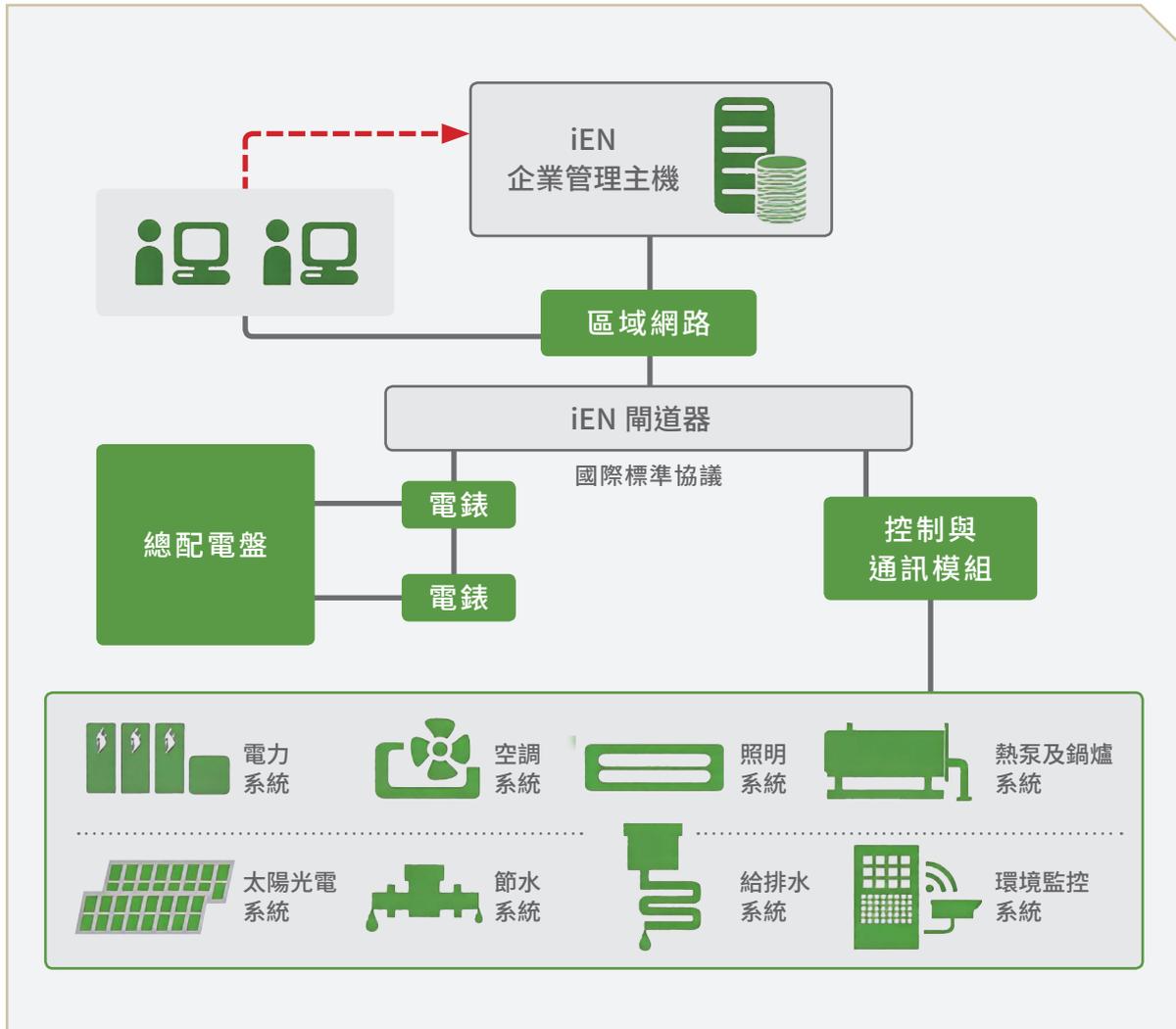


圖 19 引用自中華電信之 iEN 智慧節能服務系統架構

七、智慧三錶系統

後續維運管理階段透過智慧三錶（智慧水錶、智慧電錶、微電腦瓦斯錶）系統達成能耗參數取得，詳圖 20。

八、智慧統計系統

後續維運管理階段透過智慧統計系統進行用電量統計監測、公共設備運作監測、住宅水電用量雲端查詢等量化、可視化、圖表化統計功能，詳圖 21。



圖 20 智慧三錶示意圖



圖 21 AIoT 智慧統計系統 AI 生成概念示意圖

本工程為社會（公共）住宅領域注入諸多創新動能及作為，成為 AIoT 最新軟硬體科技與大眾常民生活接觸之橋梁，並考量建築之全生命週期皆導入 AIoT 應用，特別是施工建造階段針對智慧化及 AIoT 之著墨創新甚深，甚至開發應用諸多系統，可供國家方興未艾的社宅新建浪潮作為範例；並可供其他同類型的工程案例作為參考指標。

參考文獻

1. 曾國展、許義傑、吳匡倫、陳其豐，智慧工地科技在社會住宅的應用——以前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程為例。
2. 陳其豐、謝秉銓，AI 在營造業的應用研究——以高雄市某智慧公宅（第一期）新建統包工程為例。
3. 台灣世曦亞灣工地專管 / 監造工務所，現場執行簡報。
4. 永青營造工程股份有限公司、雄菱工程股份有限公司、石昭永建築師事務所，統包工程書圖文件。

伍、結語

本文以亞灣智慧公宅（第一期）新建統包工程為例，探討 AIoT 於智慧社會住宅的實際應用情形。本案以 AI 人工智慧結合物聯網之智慧化方法減少人力支出並提高工地管理及職安衛作為，使屬傳統產業的營建業亦能與時俱進，透過先進科技輔助營建產業轉型及緩解人力不足課題，並有助於改善營建業之傳統形象、透過人工智慧增加現場工作效率及準確性。智慧化建築亦有助於未來維運管理階段之能源消耗、人力負載、設備管理並大大增進社區永續發展之貢獻。

過港隧道高壓細水霧 整合感測交控之智慧消防系統

關鍵詞 Keywords

- # 高壓細水霧 High-Pressure Water Mist
- # 智慧化消防系統 Intelligent Fire Fighting System
- # 感測與交控整合 Sensing and Traffic Control Integration
- # 沉埋管隧道 Immersed Tube Tunnel

台灣世曦工程顧問股份有限公司 高雄工程處

協理

蔡同宏

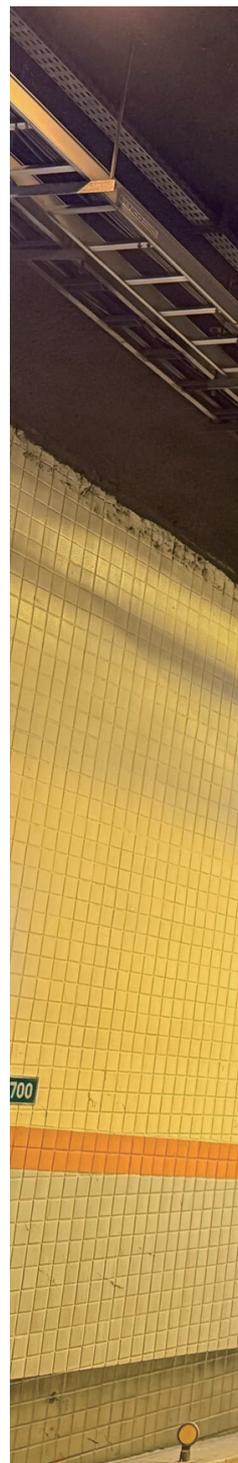
正工程師

楊盛傑

工程師

陳羿樺

高雄港過港隧道為臺灣首座且唯一的海底沉埋管式公路隧道，肩負港區物流與民生通行的關鍵任務。鑑於隧道長期運營及交通量持續增長，現有設施對於消防安全與防災韌性的強化需求日益迫切，高雄港務分公司乃興辦「高雄港過港隧道消防設備效能提升改善工程」，以「低耗水量、高冷卻效能、快速啟動、精準控制」為設計核心，導入「高壓細水霧消防系統」，並結合前瞻的智慧化感測與交通控制機制，全面提升隧道防護等級。



高壓細水霧為極小水滴粒徑，不僅可有效迅速降低火場溫度及煙霧濃度，同時亦能大幅減少消防用水，避免傳統消防水量對隧道排水負荷，以及對結構體可能造成的風險。此外，本工程亦整合 CCTV 影像監控、DTS 分散式溫度感測光纖及 PBL 手動通報，確保火災初期即能迅速且精準地啟動滅火程序，體現安全、環保與節水的綜合效益。

本案為國內隧道消防系統智慧化升級提供一前瞻且革新之實務案例，可供後續相關隧道消防效能改善推動之參酌。



壹、前言

高雄港過港隧道為臺灣交通史上極具里程碑意義工程，為國內首座採用沉埋管工法建置的海底公路隧道，於 1984 年竣工通車，自通車以來，已穩定運營逾四十餘年。隧道主體全長 1,100 公尺，設有通風、排水、照明、配電、交通監視及控制等附屬系統，並共構於高雄港區整體運輸網絡的關鍵基礎設施。

過港隧道連接高雄港第三、第四貨櫃中心，亦是高雄港物流體系的關鍵動脈，同時也是旗津地區民眾往返市區的主要聯絡通道（如圖 1），若隧道運營受阻，將對港區貨運往來效率與地方民生交通造成重大衝擊。



圖 1 高雄港過港隧道區位圖

根據高雄港務分公司歷年統計資料顯示，過港隧道平均日交通量約為 15,111 輛次，單向尖峰時段車數約達 1,270 輛次，交通量已達國內乙級隧道標準。惟隨著服務年限增長，兼以海底沉埋管隧道在構造形式與防災條件上的特異性，潛在的火災風險成為重大隱憂。

不同於常見的山岳或潛盾隧道，過港隧道沉埋管各節間的伸縮縫橡膠止水環無法承

受火災時的極端高溫，一旦結構受損極可能導致海水滲入（如圖 2）。另隧道空間狹窄（最小淨高僅 4.7 公尺），救災通道受限，消防人員難以迅速抵達事故現場，使得傳統消防系統的應變能力相對不足。

為確保第四貨櫃中心營運不中斷、維護用路人生命安全，高雄港務分公司遂推動「高雄港過港隧道消防設備效能提升改善工程」，旨在全面提升隧道整體消防防護等級。

經綜合考量隧道內部空間、集水井與排水
泵浦容量，以及結構安全與防滲需求等因
素，審慎評估採用「高壓細水霧自動滅火

系統」，此一創舉不僅為國內沉埋管隧道消
防系統新模式，亦象徵臺灣隧道安全技術
邁入智慧化與高可靠性的嶄新階段。

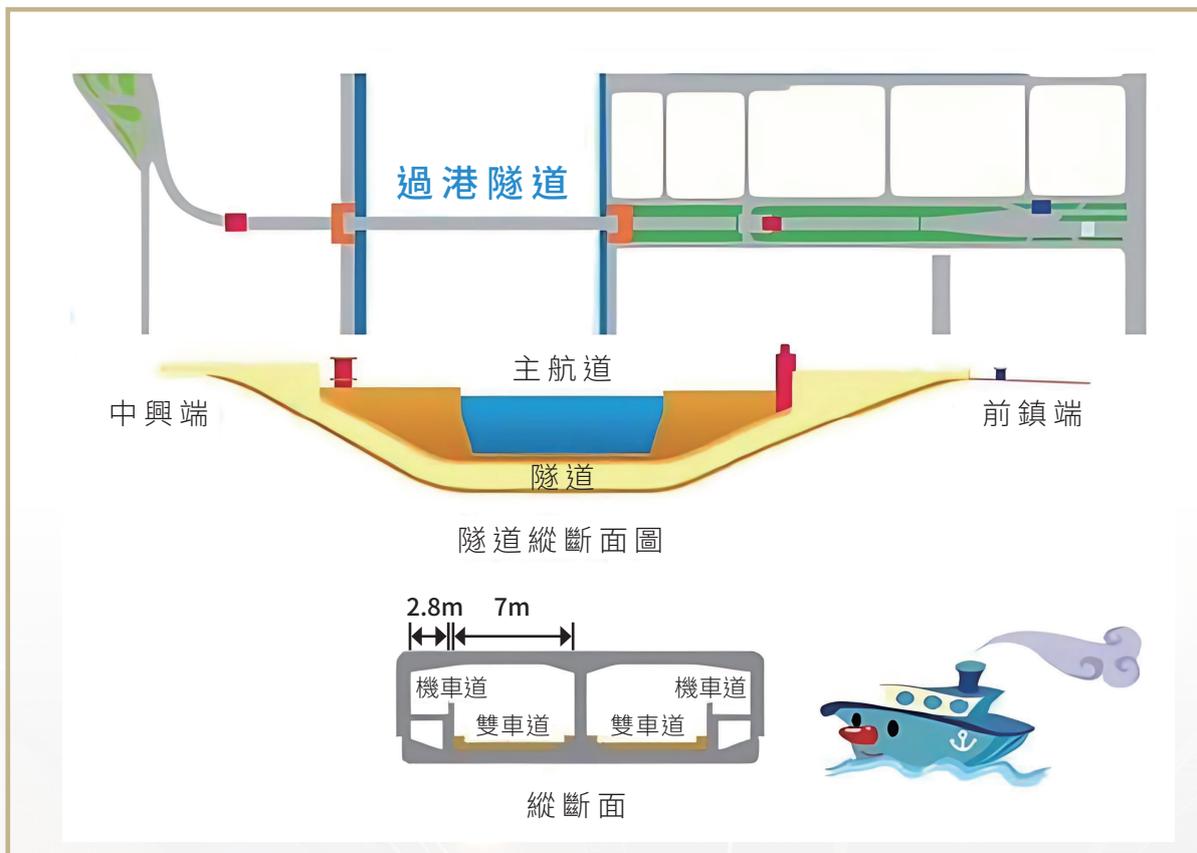
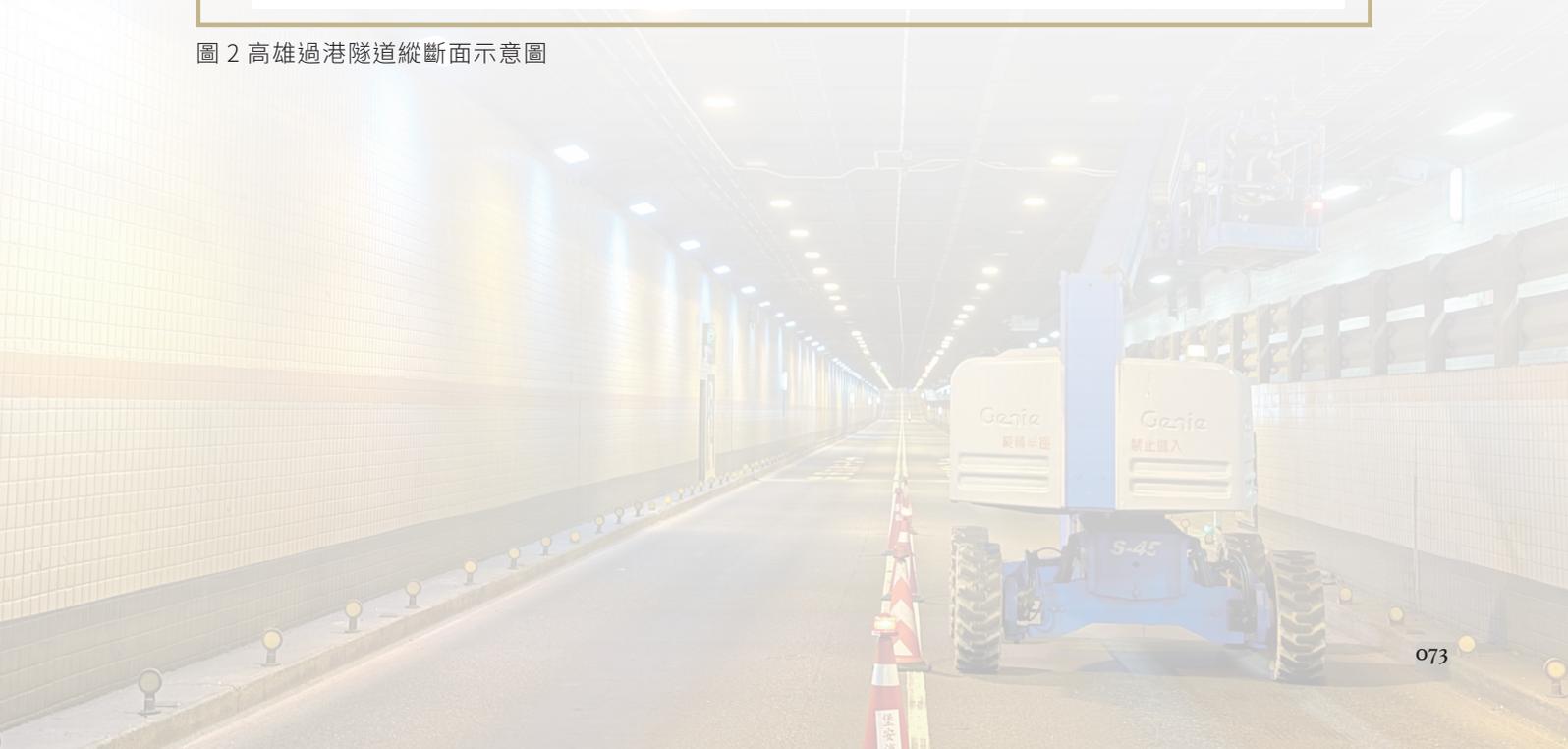


圖 2 高雄過港隧道縱斷面示意圖



貳、現況說明與既有系統分析

一、過港隧道現有消防系統之不足與升級核心考量

過港隧道在結構逐漸老化、交通量持續攀升，以及高溫火災潛在風險增加的綜合影響下，原有消防配置已難以滿足現階段的營運需求與安全要求。

原設置消防設備僅包含滅火器與隧道專用消防栓箱，當火災發生時，須由外部消防單位進入現場，以手動方式執行滅火與救援作業。此類傳統被動式消防配置雖足以應付早期設計需求，隨著使用年限延長及

環境條件變遷，其在火災應變速度、自動化防護與即時控制效能等方面，已顯現出明顯不足（如圖 3）。

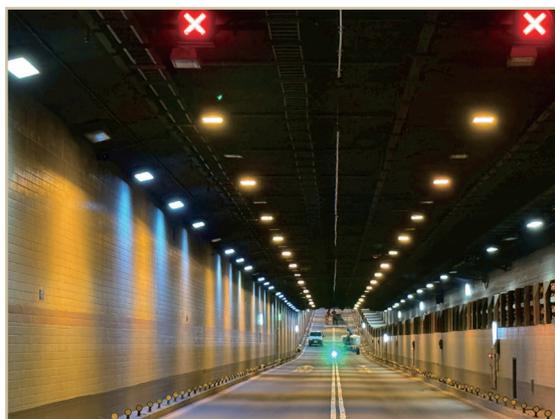


圖 3 過港隧道現況照片

根據高雄港過港隧道管理中心資料，自通車以來，隧道內雖未發生重大火災，但交通事故頻仍。例如，2001 年 10 月曾發生連續追撞事故，儘管未引發嚴重火災，但充分暴露出沉埋管隧道在車流密集、空間狹窄下，極易發生多車連鎖碰撞與火災之風險。

表 1 過港隧道肇事車種統計（2012 至 2017 年）

肇事車種	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2012~2017 年 車禍件數
機車事故	16	15	28	17	14	15	105
小型車事故	7	7	2	4	3	3	26
大型車事故	25	20	16	18	23	19	121
總計	48	42	46	39	40	37	252

資料來源：曾健彰，公路隧道火災事故現場指揮與管理系統之研究——以高雄過港隧道為例，國立高雄科技大學碩士論文

2012 年至 2017 年隧道共發生交通事故 252 件（如表 1），其中以大型車事故件數最高（121 件，佔比近一半），事故型態多為追撞或擦撞，一旦於車流高峰時段引發火勢，隧道內部溫度將可能迅速飆升至超過 1,000°C，不僅會嚴重威脅救災人員安全，更將對隧道混凝土結構與機電設施造成不可逆轉的損毀。

二、過港隧道——沉埋管隧道之特殊限制與挑戰

鑑於過港隧道之構造與運行環境具高度特

殊性（即所謂的「盆地型」海底隧道），其自動火災抑制系統的設計與選擇，必須嚴格考量以下多項關鍵因素：

(一) 防水構造耐熱脆弱性

各沉埋管間設置之防水橡膠墊圈與Ω型止水橡膠，其耐熱溫度僅約90～250°C。若隧道內發生高溫火災，橡膠材質易產生熱劣化，導致止水功能喪失，嚴重時恐造成海水滲入與結構安全疑慮。

(二) 結構負載與管線安裝限制

隧道位於主要航道下方，為沉埋管構造，任何額外吊掛設備或管線的重量與位置皆受到嚴格控管，以避免對既有管線、混凝土節塊或接縫產生裂縫及滲水風險。

(三) 空間與設備干擾

隧道淨高有限（汽車道最小淨高僅4.7公尺），狹窄的可用空間將嚴重限制自動火災抑制系統的配置與噴灑方式。

(四) 排水效能限制

過港隧道排水系統需將水由中央最低點的集中井，利用泵浦分別排至兩端中繼集中井後入海。傳統消防系統所需的大量用水，將使現有的集水坑容量與排水泵浦面臨超載的風險。

為克服傳統灑水系統在高耗水量與結構負載上的限制，並有效應對大型車事故帶來之嚴重火災風險，本工程遂導入具備快速反應、低耗水量與高冷卻效率之高壓細水霧系統，全面提升隧道防火與防災效能，確保用路人安全與港區營運穩定。

三、國內常見山岳及潛盾隧道之消防系統現況

目前臺灣大部分公路隧道多屬山岳隧道或潛盾隧道，其消防系統多以傳統水霧或灑

水系統為主，並配合消防栓及排煙設備運作。此類系統多設置於隧道頂部或側壁，藉由火警偵測系統觸發後啟動噴水降溫，屬於被動型火災抑制措施。

(一) 系統特性

1. 噴水壓力低（約5～12bar），以大量水量覆蓋火源區域。
2. 水滴粒徑較大（約1,000～5,000μm），滅火原理主要依靠覆蓋與降溫。
3. 系統結構簡單、維護成本低，適用於空間寬敞、排水能力充足的隧道。

(二) 系統優點

1. 系統技術成熟、施工容易，國內已有多年應用經驗。
2. 可迅速提供大面積水覆蓋。
3. 設備模組化程度高，可與既有消防栓系統共用部分水源與管路。

(三) 系統限制缺點

1. 高耗水量

每平方米灑水量可達10～15L/min，隧道內排水系統須具足夠容量，否則易導致積水或回流。

2. 冷卻效率低

水滴粒徑大，蒸發效率差，對高溫煙氣與輻射熱的吸收效能有限。

3. 不適用電氣與油類火災

大水量灑水可能造成電氣短路，對油燃火源效果不佳。

4. 維修困難與結構干擾

需大量吊掛設施與管線，對於空間受限的隧道不易施工。

四、系統差異比較：傳統水霧 vs. 高壓細水霧

過港隧道為沉埋管式海底隧道，其獨特的結構與嚴苛的環境限制，顯現出傳統消防系統的不可行性，表 2 為傳統水霧與高壓細水霧

系統在隧道消防應用中的關鍵差異比較。

高壓細水霧系統藉由高壓霧化技術與氣化吸熱原理，能在火勢初期迅速啟動並有效降溫，相較於傳統水霧系統具備更高的熱效率與節水效能。其低耗水量特性可顯著降低盆地型沉埋管隧道內的積水風險，減少對結構與止水設施的長期腐蝕影響。同時，高壓細水霧亦具備電氣與油類火災防護能力，並可與智慧化感測與交控系統整合，形成主動式、高可靠性的消防防護機制。

表 2 細水霧比較表

項目	傳統水霧 / 灑水系統 (Water Spray System)	高壓細水霧系統 (High-Pressure Water Mist System)
水滴粒徑	通常 1,000µm 以上。	一般低於 1,000µm。
水量需求與節水率	需大量供水，流量需求極高。	水量需求極低，約為傳統系統的 10% 至 20%。
滅火機制與效率	主要為冷卻燃燒物表面（浸潤作用），總體熱量吸收效率低。	冷卻（水滴氣化）、窒息（水蒸氣隔氧）及輻射熱阻隔，降溫速度快。
火災種類適應性	對 B 類（油類）或 C 類（電氣）火災效果有限，易造成電氣損害。	適用於 A、B、C 類火災。對電動車電池火災，能更有效地抑制熱失控（Thermal Runaway）。
結構適用性	易產生大量積水，增加結構體積載及排水負荷。	水損極低，不對結構體產生額外水體壓力，降低防滲風險。

參、高壓細水霧系統設計與智慧化整合

高雄港過港隧道沉埋管型式在結構、內部淨高、頂板吊掛限制、伸縮縫橡膠止水環等面向，均與國內常見山岳或潛盾隧道存在顯著差異，導致其消防防護需求亦不盡相同。

一、高壓細水霧設計與原理

本工程採用 AQUASYS 公司高壓細水霧濕式系統，於不鏽鋼管線內預充高壓水體，可在火警偵測後即時啟動，透過特殊噴頭將水霧化為極細微水滴（如圖 4），藉由高效

冷卻、窒息作用及輻射阻隔的複合機制，達成快速滅火與火勢控制。其低耗水、環保安全的特性，極適用於高雄港過港隧道等封閉狹長且排水受限的特殊空間。



圖 4 AQUASYS 高壓細水霧隧道現場測試示意圖

二、智慧化整合：感測與交控

為確保系統反應的迅速性與可靠性，本案與隧道既有的機電及交通控制系統進行深度智慧化整合，實現火災的即時偵測與精準啟動。整體消防系統整合多重智慧監控與感測技術，形成自動及人工並行的防護架構：

(一) CCTV 影像監控

隧道內的高解析度閉路電視 (CCTV) 負責實時監控車輛行駛與環境狀況，藉由影像分析技術自動偵測如火焰、濃煙或交通事故等異常事件，並即時觸發警示。

(二) DTS 分散式溫度感測光纖 (Distributed Temperature Sensing)

利用鋪設於隧道內的光纖實現線型連續溫度監控，高精度地定位火源發生位置，當溫度異常超過設定閾值時，系統自動判定潛在火災風險，並連動啟動滅火設備。

(三) PBL 手動通報系統 (Push Button Line)

為補強自動偵測的潛在盲區，隧道內設置手動警報按鈕 (PBL)，提供用路人在發現

異常情況時的即時通報功能。

系統啟動邏輯採「雙重判定原則」，當 CCTV、DTS、PBL 三項系統中任兩項同時偵測或通報異常時，即自動進入預警模式。控制中心人員將依據影像與感測數據確認現場狀況，並確保用路人已安全撤離火災波及區域後，方啟動高壓細水霧系統；高壓細水霧設備亦可由遠端監控工作站手動啟動 (如圖 5 圖 6)，若控制中心未於預警階段介入，系統將於預設的 3 分鐘疏散時間結束後，自動啟動分區滅火程序。

本案多重智慧化架構將消防系統由傳統的被動反應，轉變為主動、即時、精準的主動防護機制，顯著提升過港隧道整體的防災韌性。



圖 5 過港隧道管理中心



圖 6 過港隧道智慧消防

三、防護區域劃分邏輯

為符合國際隧道消防設計準則（PIARC 建議隧道每 25 至 50 公尺劃設一防護區），本案綜合考量高雄港過港隧道全長 1,550 公尺（隧道本體長度 1,100 公尺）、火源控制效率及排水集水能力等條件，規劃隧道內

每 25 公尺為一防護分區。

隧道南、北兩孔共設置 84 個防護區（每孔 42 區）。每一防護區配置有獨立的自動分區閥及三列細水霧噴頭，噴頭間距約 1.5 公尺，噴頭總數達 4,074 顆。（如圖 7）

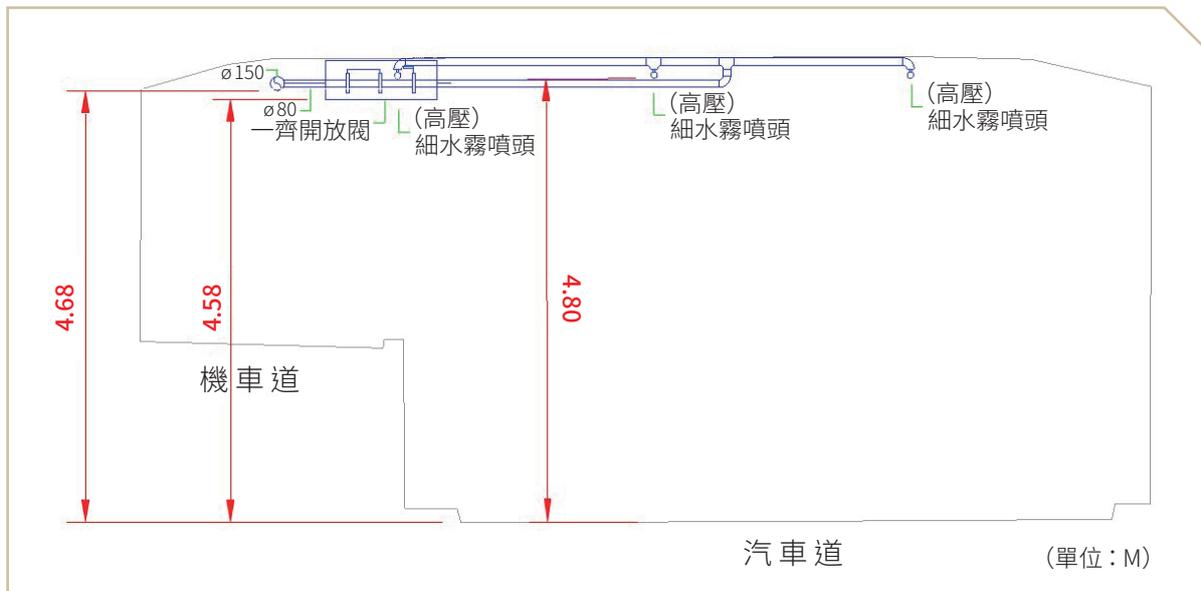


圖 7 過港隧道高壓細水霧設備佈設示意圖

系統採智慧連動啟動邏輯運作，當偵測到火警警報時，系統自動判定火源精確位置，並同時啟動火警區域及其前後相鄰各一區（即總共啟動 3 區，範圍為 75 公尺），此設計可確保火場區域獲得完整覆蓋，有效阻止火勢因氣流或熱輻射向前後快速蔓延（如圖 8）。

根據系統設計與設備規格，單顆高壓細水霧噴頭放水量約 22.8L/min，系統運作壓力可達 37.12kgf/cm²（約 36.4bar）。當火警發生時，三區同時啟動綜合放水量約 3,283.2L/min，放水密度為 4.05L/min-m²，優於原設計規範要求。

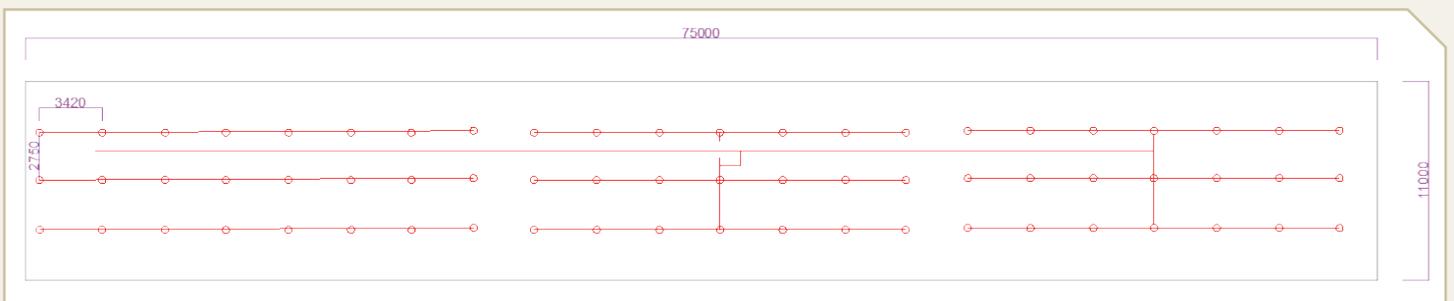


圖 8 高壓細水霧噴頭分布示意圖

高壓細水霧系統係以低耗水量、高覆蓋與精準控制為核心設計理念，在有限的隧道空間中兼顧消防效能與結構安全，使隧道消防從「被動救災」邁向「智慧防護」，達成節水、降溫與防災韌性兼具的整體效益。

肆、系統驗證與測試

為驗證高壓細水霧系統之安全性與可靠性，本工程亦擇於奧地利進行 1:1 比例原型機測試，模擬高雄港過港隧道實際運營環境條件，測試內容涵蓋設備原型機泵浦效能檢驗、放水測試，以及通車前之實境火災模擬試驗，用以全面確認該系統功能可符設計要求，並達國際隧道消防標準。

一、高壓力泵浦與關鍵元件之性能驗證

本案於隧道（前鎮端）消防設備細水霧機房內，設置 2 台高壓細水霧泵浦（採交替運轉），設計流量為 3,283.2L/min。於奧地利廠驗時亦確認該高壓泵浦（型號：MPD125A）實測出水量為 3,303L/min，高於設計流量，並符契約規定標準（如圖 9）。



圖 9 高壓泵浦設備檢驗

高壓細水霧系統之管道採預先充水設計，噴頭與主要構件均採全不鏽鋼材質製造，具備耐腐蝕與高壓抗性，確保長期穩定運

作（如圖 10）。於實驗室實際放水觀察顯示，細水霧水粒徑小於 1,000 μ m，能迅速吸收熱能並形成高密度水霧幕，有效降低火場溫度，同時抑制熱輻射與煙氣擴散（如圖 11、圖 12）。



圖 10 細水霧噴頭檢視



圖 11 AQUASYS 實驗室高壓細水霧設備測試運轉



圖 12 模擬高壓細水霧設備運轉

模擬火災時，分區閥門可透過控制中心遠端操作開啟或關閉，並具定時啟動與手動介入兩種模式（如圖 13）。即便在停電情況下，閥門仍能維持開啟狀態，顯示系統具備高度容錯力與可靠設計；經多項測試驗證，系統均展現穩定運作。

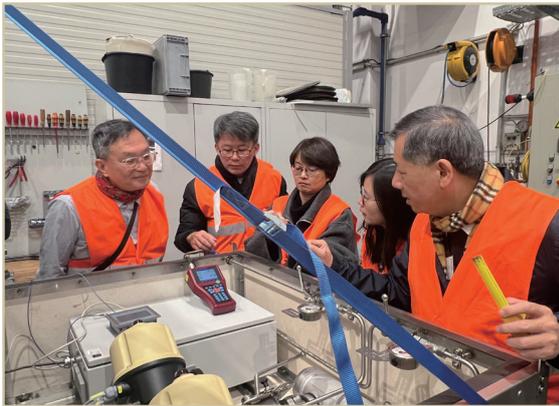


圖 13 細水霧系統設備及分區閥檢視

二、滅火效能與關鍵指標驗證（ZAB 原型機測試）

高壓細水霧 1：1 比例原型機測試於奧地利蒙坦大學（Montanuniversität Leoben）Zentrum am Berg（ZAB）地下實驗隧道進行（如圖 14、圖 15），測試隧道模擬尺寸為長 25m×寬 10m×高 4.8m，其橫斷面條件與高雄港過港隧道相似，為驗證系統的實際性能提供了充分條件。



圖 14 Zentrum am Berg 測試場區即景



圖 15 ZAB 地下實驗隧道細水霧原型機現場佈設即景

現場試驗同時由奧地利 IBS 公證機構進行檢測與認證，並提具正式測試報告。

依據現場佈設條件，於 ZAB 測試中心進行之 25 公尺分區測試結果顯示，泵浦實測流量（Required Flow Rate）均大於 1,094L/min，末端噴頭壓力（Required Pressure）亦高於 36.4Bar（如圖 16）。



圖 16 高壓細水霧原型機測試

經奧地利 IBS 公證單位現場檢驗確認，整體系統性能符合工程契約第 1397A-3.5.1 條所規定之細水霧原型機測試標準，驗證其設計與效能均達規範要求。

綜整模擬測試成果不僅為高雄港過港隧道細水霧設施增設提供堅實的技術基礎，亦促進與國外工程技術人員之專業技術交流。

伍、結論

本案成功導入先進的高壓細水霧消防系統，並與既有的隧道機電及交通控制（交控）系統進行深度智慧化整合，大幅提升了高雄港過港隧道面對火災事故的應變能力與整體防災韌性。其核心價值與卓越成果體現於以下幾個面向：

一、智慧化主動防護

高壓細水霧系統結合 DTS 分散式溫度感測光纖與 CCTV 影像監控等多重感測技術，建構了主動式的智慧啟動邏輯，顯著提高火災偵測的精準度與反應速度，實現快速、精準的火源鎖定與抑制。

二、極大化人員安全與救援時效

高壓細水霧系統能有效沉降煙塵、迅速降低火場溫度。預留 3 分鐘的人員疏散緩衝時間，為外部消防隊伍爭取了寶貴的救援部署時機，極大提升了救援成功率與人員安全性。

三、結構友善與環境永續

低耗水量特性能有效避免對沉埋管隧道脆弱的排水系統造成超載負荷，並降低了積水對隧道結構與橡膠止水環的長期腐蝕風險，達成節水、降溫與結構保護的多重永續效益。

「高壓細水霧消防系統」成功應對了極端結構敏感、低排水容量、空間受限等多重特殊限制，本案亦完整記錄並檢驗其設計理念、技術引進與性能驗證歷程，透過赴奧地利進行實地測試與專業交流，確保高雄港過港隧道細水霧系統之整體效能與可靠性。同時為臺灣未來長隧道、高風險場域及關鍵基礎設施之消防安全升級奠定重要基礎。

參考文獻

1. 曾健彰，《公路隧道火災事故現場指揮與管理系統之研究 - 以高雄過港隧道為例模式》，國立高雄科技大學（2019）。
2. 廖哲樞、張詠誌，《「高雄過港隧道消防設備效能提升改善工程」赴奧地利製造廠廠驗訪視》，臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司（2024）。
3. 王錦榮、鄭智文、林潔芬、盧佩玢，《高雄港過港隧道消防設備效能提升改善工程赴波蘭辦理廠驗及奧地利隧道管理中心訪視》，臺灣港務股份有限公司，波蘭（2025）。
4. 王榮豪，《智慧防火防災科技關鍵技術及應用規劃之研究》，內政部建築研究所業務委託計畫報告（2022）。

當城市邁向淨零—— 從輕軌看見低碳生活藍圖

關鍵詞 Keywords

- # 高雄輕軌 Kaohsiung Light Rail
- # 大眾運輸 Public Transportation
- # 綠色交通 Green Transport
- # 碳足跡 Carbon Footprint
- # 淨零城市 Net Zero City
- # 永續生活 Sustainable Living / Sustainable Lifestyle

高雄市政府 捷運工程局

局長
吳嘉昌

台灣世曦工程顧問股份有限公司 高捷專案

副總經理
莊明哲

專案協理
許朝榮

專案協理
江明珊

正工程師
郭馨

國立中山大學 公共事務管理研究所

教授
吳偉寧

本文主要參酌：

- 第 8 屆「政府服務獎」——輕軌點點串聯，無礙暢行成圓
- 高雄市政府捷運工程局之「高雄都會區大眾捷運系統小港林園線委託專案管理（含監造）技術服務」案相關研究成果：《搭乘高雄捷運（輕軌）獎勵辦法研析報告》與《高雄捷運（輕軌）取得碳權可行性報告》

展現高雄市在推動軌道運輸、低碳通勤及減碳政策上的實際作為，並透過制度設計、行為誘因與企業參與等多面向策略，成為城市邁向淨零的具體措施，揭露高雄如何以輕軌為核心，打造兼具環保、美學與生活品質的綠色城市典範。

在高雄，搭上一班輕軌，不只是通勤代步的選擇，更是邁向淨零生活的一小步。在這座被視為台灣「碳排大戶」的工業城市，正透過一條綠色軌道，擘劃一座城市低碳生活藍圖。隨著 2024 年 6 月《高雄市淨零城市發展自治條例》通過，成為「氣候變遷因應法」後首部地方淨零法規，軌道運輸不再只是交通建設，而是檢視淨零轉型的重要縮影。

捷運（輕軌）被定位為低碳交通的象徵，不僅改善通勤環境，更被寄望能創造碳排減量效益，甚至進一步跨入碳權市場。然而，要將「搭輕軌 = 減碳」轉化為可交易的碳權並不容易。更關鍵的是如何追蹤並鼓勵乘客改變原本的交通方式「從開車、騎機車的生活習慣，轉向搭乘大眾運輸（輕軌）」的習慣，才被認定是真正的減碳。

面對挑戰，高雄正在轉型，積極推動輕軌、自行車、公車與捷運串聯，並透過票價補助與企業合作，鼓勵市民、學校與公司更廣泛使用大眾運輸，逐步建構低碳交通網絡。當高雄朝 2050 淨零城市目標邁進時，從一張車票、一段軌道，延伸出的是城市永續藍圖，也是全民共享的低碳生活願景。



壹、高雄邁向淨零的第一步

一、工業城市的減碳課題

高雄市的經濟主要依賴重工業與服務業，其中包括高碳排之石化業、金屬冶煉工業、煉油產業、水泥業與電力業等，相對於其他縣市來說，減碳之項目與產業別更為廣泛複雜，金屬機械與石化產業長期以來屬於碳排放量較高的核心產業。根據高雄市 2021 年溫室氣體盤查資料顯示，2021 年高雄市平均碳排放量為 5,737 萬公噸 CO₂e，約占全臺 20% 左右，透過政府與企業共同努力後，相較 2005 年已減少 13.2%，減碳逾 877 萬公噸 CO₂e，遠超越國家所設立 2025 年目標值 10%，位居縣市中減碳排名第一。

然而，若僅依靠產業的減碳技術，要在短時間內達成 2050 年淨零排放的願景，仍需面臨艱困挑戰。技術研發與導入，需要長期投入與較龐大的成本，高碳產業轉型也非一蹴可幾。要真正推動淨零轉型，除了技術創新，還必須結合政策推動、產業結構調整與社會生活改革，並同步強化城市交通、能源轉型及社會行為等面向的整合治理，才能形成全方位的減碳行動體系。

二、法制化的淨零轉型基礎

聯合國於 2015 年 12 月 12 日在法國巴黎召開第 21 屆氣候變遷大會（COP21），針對氣候變遷與 195 個締約國協定通過《巴黎協定》公約，希望能將全球溫度維持在工業革命前，並將平均升溫控制在 1.5 度至 2 度之間。當各國都在關注於如何降低溫室氣體排放的途徑及制定 2050 年淨零排放的目標時，雖然臺灣不是聯合國成員，但仍致力於加入減碳的行列。

行政院環境保護署 2021 年 10 月底提出「溫室氣體減量及管理法」（簡稱溫管法）修正草案，並修正名稱為「氣候變遷因應法」（簡稱氣候法）除了明定我國長期減量目標為 2050 年（中華民國 139 年）溫室氣體淨零排放外，亦針對碳費、低碳技術、調適專章等進行修訂。該法案於 2022 年 4 月 21 日經行政院通過，送請立法院審議，並於 2023 年 1 月 10 日三讀通過，並於 2023 年 2 月 15 日經總統公布修正。「氣候變遷因應法」，其規範之重點包含納入 2050 年淨零排放目標、確立部會權責、增列公正轉型、強化排放管制及誘因機制促進減量、徵收碳費專款專用、增訂氣候變遷調適專章、納入碳足跡及產品標示管理機制，並強化資訊公開及公眾參與機制。

高雄市於 2024 年通過《高雄市淨零城市發展自治條例》，成為全臺首部地方層級的淨零法規，正式將減碳行動納入城市治理的核心。其中，第 17 條規定「本市大眾運輸系統沿線之一定範圍內經本府公告之機關、學校、民間團體及工商廠場，應研擬鼓勵員工搭乘大眾運輸系統措施；其員工搭乘人數達一定比例以上者，本府得給予獎勵。」這項條文不僅展現高雄推動「減碳交通」的決心，也反映出在追求淨零的過程中，嘗試從制度面引導市民改變日常通勤的習慣，讓「搭捷運、搭輕軌、搭乘大眾運輸」成為生活高雄市民的常態。

三、地方願景的具體化：十年築出綠色輕軌圓夢線

近年來，高雄市的淨零碳排藍圖日益完善且具體成熟。其中，因應淨零碳排，高雄成立「產業淨零大聯盟」，由產業龍頭企業攜手 51 家企業，以「大帶小」模式打造低

碳產業鏈，展現產業界共同邁向淨零的決心與行動力。

高雄的減碳行動，不只是一要讓數據變漂亮，更要讓市民真正感受到生活的改變。為此，市府以「綠色生活圈」為主軸，推動步行、輕軌、自行車、公車與捷運的整合，讓低碳出門成為日常生活的一部分，同時把「低碳交通」納入都市再生與觀光發展的策略中。這樣的轉變，代表從過去以「建設為主」的思維，走向以「生活為本」的新方向，軌道運輸更成為帶動居民改變通勤習慣與生活方式的起點。

在此規劃藍圖下，輕軌系統即為重點推動的交通工程，以「環狀連結、低碳運輸、城市共融」為核心理念（如圖1），透過環狀站點規劃串接高雄市多個核心區域，連結醫療、百貨、觀光與交通節點，再加上紅橘線捷運的十字型覆蓋，不僅提升大眾運輸的服務密度與便捷性，更促進城市活化與均衡發展。

當減碳行動從政策口號轉化為市民日常的交通選擇，這條歷時十年築成的輕軌圓夢線，也成為高雄邁向淨零城市的見證。



圖 1 四線齊發路網示意圖

資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局



貳、成效展現——高雄輕軌的城市效益與永續價值

一、軌道運輸（輕軌）：從通勤工具到淨零關鍵力量

輕軌具備「公共服務」與「氣候行動」的雙重角色，讓市民通勤更為方便，也透過減少汽機車使用、降低碳排放量，成為城市邁向淨零的重要基礎建設，輕軌成圓後的環狀路網滿足跨區域交通需求，遍行前鎮、前金、鹽埕、鼓山、左營、苓雅、鳳山等既有人口密集發展區，沿線服務範圍涵蓋 25 間學校、5 間醫院及多處重要景點，並與捷運、公車、台鐵及 YouBike 緊密整合，提供市民更便捷的轉乘選擇。綜觀而言，輕軌之所以能成為高雄邁向淨零的重要基礎建設，其原因有三：

(一) 以電能為主要動力，能大幅降低運具碳排放，並結合全線無架空線設計（如圖 2），全線採用「超級電容快速充電」設計，列車停站 25 秒即可充飽電力，進一步提升能源使用效益，展現低碳、節能且永續的運輸典範。

(二) 輕軌自成圓以來，2024 年全年旅運人次達 1,258 萬，創下單年度新高，相較 2023 年 776 萬旅次，增加約 62%，平日平均每日達 3 萬 4,696 旅次，假日則達 4 萬 3,132 旅次，顯示愈來愈多市民願意由私人運具轉向大眾運輸，實現「以行為促進減碳」的目標。

(三) 創造綠色效益，融合生態環境（如圖 3、圖 4），並採用輕量化及透明化車站設計，降低都市熱島效應，綠覆率達 68%，



圖 2 全國第一條環狀無架空線輕軌系統

資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局，「第 8 屆「政府服務獎」——輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」

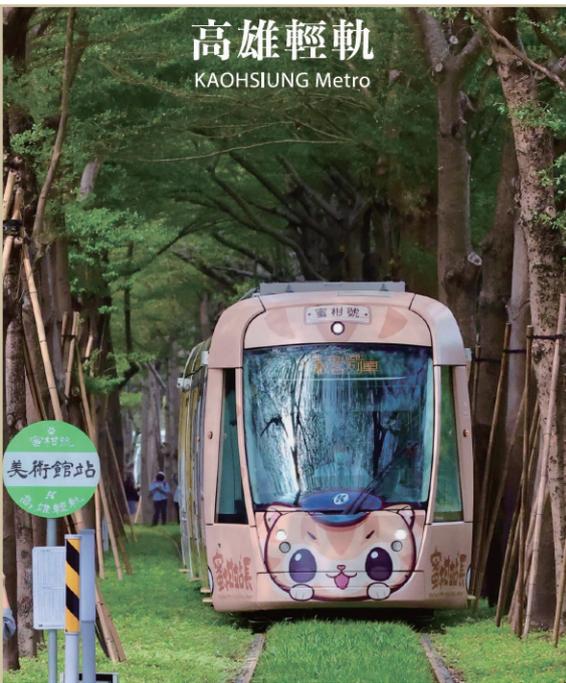


圖 3 美術館路段龍貓隧道
 資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局，「第 8 屆「政府服務獎」——輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」



圖 4 大順路段綠巨人隧道
 資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局，「第 8 屆「政府服務獎」——輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」

以站就樹，成功保留在地超過 94% 兩豆樹、增加綠地面積 86,255 m²、固碳量 3,607 噸。

二、以人為本的友善移動：從技術到情感的城市共融

列車全線採用「100% 低地板車廂」與「開放式月台及無閘門設計」，推娃娃車、輪椅、提行李都可輕鬆上下車，並全面設置「無障礙設施環境」，滿足全齡化綠色交通需求。沿線步道、自行車道無縫銜接，讓「輕軌即街道」成為城市共融的新樣貌。

面對短程通勤與就學族群對交通時效的高度需求，自 2024 年 11 月起推出的「V 高雄」APP（如圖 5），運用智慧科技提升乘車體驗。整合輕軌即時到離站資訊、列車位置、各站時刻表與車廂擁擠程度，讓乘

客能隨時掌握列車動態，打造更便利與人性化的搭乘環境。未來系統更將結合沿線商圈推出實境地圖，讓旅客不僅能順暢轉乘，更能輕鬆探索周邊生活圈，形成科技與低碳城市共融的智慧運輸新樣貌。

高雄捷運 V 高雄 APP 正式上線

一手掌握捷運及輕軌資訊 ∨



- ✔ 列車即時動態
- ✔ 車廂擁擠度查詢


掃描QR下載APP
搶先體驗全新功能

圖 5 「V 高雄」APP
 資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局，「第 8 屆「政府服務獎」——輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」

因應輕軌進入市區後的交通安全需求，導入智慧監測技術，於重點路口及車站配置「路口防碰撞警示系統」、「地面警示燈」、

「運用 AI 安全偵測」等設施（如圖 6），透過即時警示機制，有效預防事故發生，強化整體交通安全管理，提升民眾搭乘率。



圖 6 輕軌智慧警示系統

資料來源：2025，高雄市政府捷運工程局，「第 8 屆「政府服務獎」—輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」

三、從個人行為到組織行動：高雄 MeNGo 月票引領企業減碳新模式

搭乘運輸工具的碳排放量取決於多個因素，包括所使用的交通工具、行駛距離、載客率、能源來源等。一般而言，使用較為高效的公共交通工具（如大眾運輸、共享單車、共享電動車等）相較於私人汽車，碳排放量會較低，特別是在城市交通擁擠的情況下。然而，要真正達成大規模減碳的目標，僅依賴個人選擇仍不足夠，必須從城市整體規劃、能源轉型與制度設計等層面共同推動，才能形成長期而穩定的減碳體系。

高雄市政府近年以「MeNGo 月票」為核心，整合捷運、公車、輕軌、渡輪及 YouBike（前 30 分鐘免費無限次使用）等運具，建構完整的低碳通勤生態系。不僅

讓市民出行更便利，也減輕上班族與學生的交通費用負擔，更透過誘因導向政策，引導民眾將日常通勤轉化為具體的減碳行動。MeNGo 月票的推動（如圖 7），展現高雄以大眾運輸為主軸的永續交通策略。

在高市府交通局的指導與支持下，東南水泥集團為響應低碳運輸、減緩氣候變遷及台灣 2050 淨零排放目標，與一卡通公司三方合作導入 ESG 企業差勤卡，透過補助企業員工購買 MeNGo 月票，鼓勵搭乘低碳運具，共同打造低碳永續的綠色城市，東南水泥亦成為高雄市首家以團購方式支持市府月票政策的上市企業。一卡通公司致力於打造領先的 FinTech 金融科技服務，並運用全場域數據協助政府與企業推動數位轉型，此次整合企業差勤卡與低碳運具的搭乘數據，讓交通數據得以能追蹤與檢視減碳成效，進一步實現 ESG 綠色永續目標。

高雄399

- 月票價格：
399元(QR月票相同價格)
- 搭乘運具：
高雄捷運、輕軌、公車、客運、渡輪(人)、YouBike 2.0(E)、臺鐵(大湖-九曲堂站)
- 購買TPASS一卡通：
四大超商預購、高雄捷運車站服務台
- 設定月票：
1.MeN Go 官網/APP(線上信用卡/Line Pay付款)
2.高雄捷運車站服務台(現場付現)
3.7-11 iBon (現場付現)
4.台鐵售票窗口(現場付現)
- 退票規定：
1.購買後未啟用於一個月內申請退費
2.啟用後請於效期內進行退費
退票金額=399 - (經過天數 x 每日扣減150元-退票手續費20元)
不敷扣除者不予退費。
QR 月票退費不收手續費

註：上述「經過天數」係指月票生效日起算至「申請退票日」之天數，含申請退票當天(以客服電話或指定通路服務時間為準，非服務時間不受理)。

經過天數	退票金額(手續費20)	QR版 退票金額
未啟用	379	399
1日	229	249
2日	79	99
3日	0	0

圖 7 MeNGo 月票(高雄市區 399 通勤月票)

資料來源：2025，高雄市政府交通局 TPASSxMeNGo 平台，<https://www.men-go.tw/#/MProductBuy/90>

四、由國際經驗啟示：從稅務誘因到企業責任

從表 1 可知：歐美與日本多以「經濟誘因」作為鼓勵低碳通勤的手段，例如美國以稅前扣除與免稅補貼支持員工搭乘大眾運輸；丹麥及荷蘭提供企業交通津貼或里程補助；日本結合企業制度性報銷與交通津貼，使搭電車上班成為普遍文化。這些制度共同的特色是將通勤減碳行為制度化、財務化，讓員工在日常選擇中自然而然傾向選擇低碳模式。

相較之下，台灣的通勤補助政策仍以地方票價優惠為主，高雄市則透過《高雄市淨零城市發展自治條例》將「低碳交通」納入城市治理架構，以「MeNGo 月票方案」及「企業合作通勤補助」等措施，來降低通勤

成本、提升搭乘誘因，逐步引導市民轉向搭乘大眾運輸。

五、企業參與的力量

在政策制度層面，《就業保險促進就業實施辦法》第 28 條已明定異地就業交通補助制度，依通勤距離提供每月 1,000 至 3,000 元不等的補助，最長可發給 12 個月。此項制度的推行，不僅有效減少長距離通勤者的交通負擔，也透過補助誘因鼓勵民眾採取穩定就業與規律通勤。

捷運公司與捷運局還可以通過和在地機構合作，推出綠色通勤獎勵計劃，進一步鼓勵民眾選擇捷運等低碳交通方式。這類獎勵計劃可以包括積分兌換、票價優惠或參與綠色出行的抽獎活動等形式，從而增加公眾參與的積極性。

表 1 國際通勤補助政策比較表

案例	政策名稱	主要內容	稅務優惠方式	台灣可行建議
美國 舊金山	Bay Area Commuter Benefits Program	員工可用稅前工資支付公共交通費用，免繳所得與薪資稅（上限 300 美元 / 月）	稅前扣除通勤費用	設計低碳通勤支出可稅前扣抵機制
丹麥 哥本哈根	Erhvervs kort 企業通勤卡	公司購買通勤卡享稅收優惠，通勤超過指定距離可申報交通費扣除	免稅通勤卡與交通距離扣除	推動替代通勤扣除額制度，依搭乘次數申報減稅
荷蘭	交通補助免稅制度	雇主每公里可給 0.21 歐元免稅補助，自費搭大眾運輸者可獲全額補助免稅	每公里免稅補助或免稅報銷	規劃交通碳足跡折抵額，雇主補助不列入課稅
美國 費城	SEPTA Key Advantage 計畫	企業為員工購買捷運卡，可享稅務減免並降低 FICA 稅，具留才與環保功能	捷運卡列入稅務減免項目	納入企業綠色支出抵減項目或碳稅豁免依據
日本	通勤津貼免稅政策	每月 15 萬日圓內通勤費免稅，並依通勤距離提供自行車 / 機車補助	固定金額通勤津貼免稅	設計綠色通勤津貼免稅額度

資料來源：「2025，高雄市政府捷運工程局，「高雄都會區大眾捷運系統小港林園線委託專案管理（含監造）技術服務」案相關研究成果：《搭乘高雄捷運（輕軌）獎勵辦法研析報告》與《高雄捷運（輕軌）取得碳權可行性報告》

在地方與園區推動方面，新竹科學園區以大型電動巴士串聯生醫園區、高鐵站與竹南園區，透過綠色接駁取代自駕通勤，不僅減少車流壅塞與碳排放，也象徵「低碳園區」的新典範。聯發科以綠色運輸為核心，設置上下班接駁巴士、跨辦公室電動車接駁及 M-bike 公務腳踏車，藉由制度化管理取代私人運具。富邦金控與台北市政府合作推出「電動公車汰舊換新融資專案」，協助汰換電動公車，開啟金融機構與地方政府攜手推動低碳運具發展的新模式。台新證券結合悠遊卡推出「ESG 永續卡」，以通勤碳排數據轉換為獎勵，員工已減少 16,208 公斤二氧化碳，相當於種下 108 棵樹，展現台灣企業將永續理念落實於日常通勤的具體成效。

此外，一些企業將採補助與約束並行。田中系統明定員工若領取通勤補助，即不得騎乘或駕駛私人交通工具上班，以確保補助落實於低碳通勤。新鼎系統則提供公司接駁車，平均每年運行 600 班次、平均每班乘載 20 人，兼顧員工安全與永續交通管理。在基礎設施層面，桃園機場公司於 2021 年設立「桃園國際機場空氣品質維護區」，全面汰換燃油拖車為電動車，並與環境監測同步進行，示範大型場域減碳管理的可行。

綜觀目前趨勢，政府與企業正逐步從單一的交通補助措施，轉向以「制度化、數據化與跨域合作」為核心的低碳通勤策略。在這些實踐，揭示出低碳交通政策在社會結構中日益深化的影響力。唯有透過政策創新與產業參與的並進，才能持續推動城市邁向淨零轉型的長程目標。

參、低碳交通的多元推動策略

一、市民通勤行為轉型與減碳潛力：問卷分析結果

為了解高雄市民的通勤現況與未來行為轉變的可能性，針對市民進行問卷調查（樣本數 225 份），探討大眾運輸使用率與個人交通習慣的改變意願。調查結果顯示，高雄通勤仍以私人運具（汽車、機車、腳踏車等）為主要交通方式，占總樣本數的 86.6%，反映出市民對機動性與時間彈性的高度需求，而固定使用捷運、輕軌、公車通勤者比例占 13.3%，顯示軌道運輸在市區通勤結構中仍有成長空間。未來若能透過提升接駁便利性、票價優惠與軌道路網的密度，將有機會逐步改變高雄市民的通勤習慣。

然而，在模擬誘因的情境下，有超過半數的填答者表示，可能會因為低碳運輸的便利性提升、政府和企業提供經濟激勵，願意改變並開始搭乘低碳運輸。為有效提升大眾運輸使用率，政府應強化基礎設施建設，綿密軌道建設轉成率，完善接駁系統並優化班次安排；企業則需透過設立內部激勵機制與提供實質支持措施，推動員工改變通勤方式。未來政策應因應多元化交通需求及生活方式，提供靈活且具吸引力的低碳運輸選擇。

整體而言，問卷結果顯示「誘因導向」的實踐潛力，若機關能持續透過獎勵機制等措施，不僅能擴大企業、市民減碳參與的意願，也能讓行為變化成為軌道運輸減碳成效的主要來源，進一步支撐高雄邁向淨零城市的願景。

二、教育與宣傳：從認知轉為行動的力量

為響應《高雄市淨零城市發展自治條例》第 17 條，訂定獎勵機制，將減碳概念融入校園與師生的日常。

教育與行為改變方面，應借助社交媒體與數位工具增強民眾對低碳交通的認識，並推廣綠色出門理念。同時，可擴展綠色通勤獎勵計劃，例如透過積分兌換票價優惠或綠色商品的方式，提升公眾參與意願。

在財政與政策支持上，建議建立專項基金，保障低碳交通發展的長期資金投入，並強化政策的透明性與連續性，提升各方對政策的信任。減碳行為若要長期維持，必須轉化為社會文化。

在民眾參與和環境教育方面，提升居民的環保意識，鼓勵社區積極參與環境保護行動，並提供相關的教育與培訓，培養民眾對永續發展的認知與實踐能力。

除制度面的推進，機關也透過創意文化行銷，讓減碳理念以更貼近生活的方式融入市民。高雄推出多款輕軌彩繪列車，結合人氣 IP 與大型活動合作，如 Netflix《魷魚遊戲 2》主題列車、冬日遊樂園吉伊卡哇聯名列車與大港開唱主題車廂等，以娛樂結合永續，吸引市民與遊客主動搭乘輕軌，體驗高雄的城市魅力。

同時，善用輕軌站距密集的優勢（500 至 800 公尺之站間距離），配合各項大型活動進行交通引導與人潮疏運，讓民眾在參與活動的同時，得以選擇更環保的交通方式。這樣的策略不僅提高輕軌的辨識度與搭乘體驗，更讓減碳行為成為一種被看見、被參與、被共享的城市文化。

三、工程再造：提升捷運路網藍圖

透過區域開發，綿密軌道運輸轉乘率，高雄市政府正積極推動興建捷運岡山延伸線、小港林園線及捷運黃線；透過軌道運輸提高民眾搭乘率，擘劃高雄低碳生活藍圖。

環狀輕軌於 2024 年 1 月 1 日完成全線成環通車營運，營運路段達 22.1 公里，服務範圍增為 38 站。分析 2024 年上半年高雄輕軌總計服務 658 萬人次，相較 2023 年上半年 375 萬人次，增加約 75%，2024 年全年旅運人次達 1258 萬，創下單年度新高，顯示輕軌成圓後運量逐漸穩定提升。依表 2 所示，環狀輕軌成圓後，2024 年度之減碳量約達 3,238 tCO₂e。

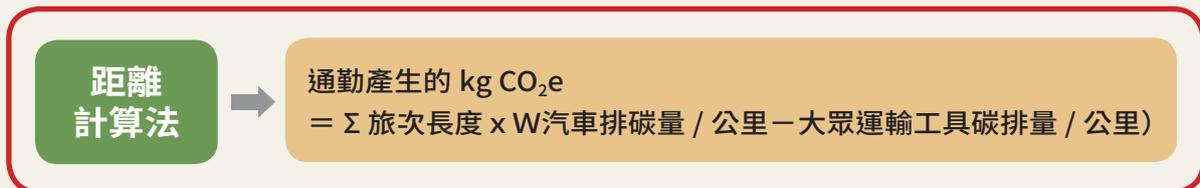
表 2 碳揭露——高雄輕軌排放量統計表

2024 年	高雄輕軌運量 (人次)	單月排放量 (tCO ₂ e)	減碳量 (tCO ₂ e)
1 月	1,259,327	131	324
2 月	1,654,558	173	426
3 月	943,243	98	243
4 月	885,821	92	228
5 月	905,564	94	233
6 月	936,946	98	241
7 月	904,543	94	233
8 月	1,008,981	105	260
9 月	928,172	97	239
10 月	886,643	92	228
11 月	995,474	104	256
12 月	1,271,873	133	327
總計	12,581,145	1,311	3,238

資料來源：高雄捷運股份有限公司之數據統計表

若沿線 500 公尺範圍內學校及企業的參與率達到 30%，以 2024 整年度搭乘數據平均計算。原輕軌日平均搭乘次數為 34,374.71 人次，每日新增 30% 通勤搭乘率約 10,312.41 人次。加總後，每日總通

勤人數加總約：44,687.12 人次。將有助於提升輕軌的日均流量及減碳量。(交通部統計查詢網) 若參與人數達 30%，減碳量預期效益，公式試算如下：



- 每人平均搭乘公里：8.53km。
- 平均每日搭乘人次：34,374.71 人次。
- 預計新增 30% 人次：10,312.41 人次。
- 汽車 1km 排放量 0.173 kgCO₂e。
- 輕軌 1km 排放量 0.039 kgCO₂e。

$$8.53 \times (0.173 - 0.039) \times 10,312.41 = \text{約 } 11,787.29 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\frac{\text{公里}}{\text{人}} \times \frac{(\text{CO}_2\text{e kg})}{\text{公里}} \times \frac{\text{新增人數}}{\text{天}} = \frac{(\text{CO}_2\text{e kg})}{\text{天}}$$

預計未來環狀輕軌依此運量成長 30% 人次時，預估其碳排量將會再減少約 11.787 tCO₂e/ 天之碳排量。

四、數據治理：減碳平台的願景

後續，將建立以數據管理為核心的減碳平台，整合交通運具數據、能源監測與碳排報告，此平台不僅驗證減碳成效，也可成為政策決策與碳權申請的依據。透過記名票證與碳量測，市民的搭乘紀錄被轉化為具公信力的碳減量。平台依「搭乘距離與頻率」分配碳權，允許進行交易，讓大眾運輸不僅是通勤工具，更成為全民參與碳市場的入口。

同時，明確界定碳權歸屬一屬於個人還是企業，將會是推動制度化運作的關鍵，避免交易或歸屬不明帶來爭議。此外，建立透明且可信的減碳平台，將使用者搭乘資訊與碳交易市場進行連結，讓每一筆通勤紀錄都能被量化與驗證。學校與企業也可以試行「碳存摺制度」，透過電子平台記錄碳排放與減碳量，讓每個人都能清楚了解自己的碳表現，將民眾日常通勤轉化為實質碳權的先行城市。

肆、結論與建議

一、結論

輕軌是台灣第一條以低碳生活藍圖為核心的都市軌道系統，意義已超越交通運具本身，成為推動高雄市邁向淨零轉型的具體象徵。未來，高雄市持續透過制度深化、科技驗證、教育推廣等，將輕軌之減碳效益轉化為全民行動。每一段軌道都連結著市民的減碳足跡，高雄的淨零未來，已在這條綠色軌道上前進。從規劃、建設到營運，輕軌展現出交通、環境與生活的共同效益，為台灣永續理念落實於城市治理提供了具體典範。

在環境面，高雄輕軌以電能驅動、無架空線設計及高綠覆率環境整合，將運輸工具轉化為兼具景觀美化與節能功能的城市綠廊。車站周邊保留在地雨豆樹群，透過綠化帶設計，降低都市熱島效應，展現基礎建設與生態共存的實踐精神。

在交通面，輕軌完成環狀成圓後，市民逐步由私人運具轉向搭乘大眾運輸，交通體系的改善已具體從市民行為反映出低碳成果。更重要的是，輕軌不僅提升交通效率，也重塑高雄市的空間使用模式，使「以大眾運輸為核心」的都市發展藍圖成形。

在社會與文化層面，輕軌以低地板車廂、無障礙設計與開放月台的友善措施，實現全民共享的交通願景。結合文化創意與智慧科技的輕軌系統，不僅展現城市美學，也實踐永續發展。

最後，在政策層面，高雄以《高雄市淨零城市發展自治條例》為法制基礎，結合MeNGo月票、企業差勤卡之跨域合作，形

成兼具誘因與制度化的減碳治理機制。

輕軌不僅載著乘客，也承載著城市在減碳策略上的各種嘗試與創新。整體而言，輕軌在高雄淨零發展藍圖中扮演關鍵推手，是推動高雄市蛻變的重要力量。其成果證明，當交通轉型與環境治理相互結合，減碳行動便能自然而然融入市民生活中，減碳行動也能成為城市的日常，高雄成功與市民、企業共同打造永續生活。

二、建議

(一) 推動「減碳平台」

以輕軌為核心，整合一卡通、能源監測及乘車數據，建立「減碳數據平台」。將減碳量轉化為可驗證的碳權單位，並於校園或企業試行「碳存摺制度」，讓每次搭乘都能累積具公信力的碳權憑證。

(二) 強化誘因導向與企業合作模式

可參考歐美通勤補助制度，推動「通勤費稅前扣抵」、「通勤補助免稅」等政策，並鼓勵企業納入ESG通勤指標，鼓勵企業設置內部低碳交通基金，形成可持續性的減碳。

(三) 提升交通整合與智慧管理系統

進一步強化輕軌、捷運、公車、自行車等大眾運輸之串聯，完善轉乘空間與票制整合制度，並持續升級「V高雄」APP功能，強化智慧交通服務與減碳治理之結合。

參考文獻

1. 高雄市政府捷運工程局，「第8屆「政府服務獎」—輕軌點點串聯，無礙暢行成圓」(2025.6)。

2. 高雄市政府捷運工程局，「高雄都會區大眾捷運系統小港林園線委託專案管理（含監造）技術服務」案相關研究成果：《搭乘高雄捷運（輕軌）獎勵辦法研析報告》與《高雄捷運（輕軌）取得碳權可行性報告》（2025）。
3. 高雄市政府環境保護局，「推動溫室氣體減量計畫」，取自：<https://ksep.b.kcg.gov.tw/EPBusiness/BusinessH.htm>（2019）。
4. Tsai, M.-S., Hsu, S.-L., and Liu, W.-Y., "Toward green transition in the post-Paris Agreement era: The case of Taiwan," *Energy Policy*, Vol.165, Article 112960, Elsevier（2022）。
5. 高雄市政府環境保護局，「高市府環綜字第 11135766500 號函」，刊登於《高雄市政府電子公報資訊網》，取自：<https://gaz.kcg.gov.tw/download/bulletin/08bba7b2-aca1-441c-af73-1cd47c295eaf.pdf>（2022）。
6. 環境部氣候變遷署，「氣候變遷因應政策」，取自：<https://www.moenv.gov.tw/ccca/D2B61B18C99F9C47>（2023）。
7. Hussain, Z., Marcel, B., Majeed, A., and Tsimisaraka, R. S. M., "Effects of transport-carbon intensity, transportation, and economic complexity on environmental and health expenditures," *Environment, Development and Sustainability*, Vol.26, No.7, pp.16523–16553（2024）。
8. iPASS 一卡通股份有限公司，「搶攻淨零減碳經濟！高雄市交通局、東南水泥集團與一卡通攜手導入 MeNGo 企業月票」，取自：<https://www.i-pass.com.tw/News/Detail/103271>（2023.6.6）。
9. 行政院勞動部，「就業保險促進就業實施辦法」，全國法規資料庫，取自：<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?pcode=N0050025&flno=28>（2024.2.16）。
10. Thøgersen, J., "Promoting public transport as a subscription service: Effects of a free month travel card," *Transport Policy*, Vol.16, No.6, pp.335–343（2009）。
11. Xie, Y., Danaf, M., Lima Azevedo, C., Akkinepally, A. P., Atasoy, B., Jeong, K., and Ben-Akiva, M., "Behavioral modeling of on-demand mobility services: General framework and application to sustainable travel incentives," *Transportation*, Vol.46, pp.2017–2039（2019）。
12. 黃羿馨，「竹科引進 2 輛大型電動巴士 8 月起直達高鐵站、竹南園區」，聯合報，取自：<https://udn.com/news/story/7324/7336552>（2023.7.31）。
13. 聯發科技股份有限公司，「聯發科技永續報告書」，取自：https://d86o2zu8ugzlg.cloudfront.net/mediatek-craft/reports/CSR/%E8%81%AF%E7%99%BC%E7%A7%91%E6%8A%802022%E6%B0%B8%E7%BA%8C%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8%E4%B8%AD%E6%96%87%E7%89%88_Final.pdf（2023.6.25）。
14. 富邦金融控股股份有限公司，「富邦金控 2022 年永續報告書」，取自：<https://www.fubon.com/financialholdings/>

citizenship/downloadlist/downloadlist_report/Fubon_ESGreport_2022_CH.pdf (2023.7)。

15. 戴玉翔，「台新證券攜悠遊卡推綠色通勤已減少 1.6 萬公斤碳排放量」，經濟日報，取自：<https://udn.com/news/story/7239/7452918> (2023.9.20)。

16. 田中系統，「關於補助」，制度與福利－田中系統，取自：<https://tscloud.com.tw/recruit/archives/474> (2021.1.20)。

17. 新鼎系統股份有限公司，「2022 新鼎永續報告書」，取自：<https://www.asi.ctci.com/www/ASI/upload/page/PG1098-F1.pdf> (2023.8)。

18. 桃園國際機場股份有限公司，「2022 年永續報告書」，桃園國際機場股份有限公司，取自：<https://www.taoyuanairport.com.tw/api/uploads/files/20230811/2d93cfba-c1f2-46ac-bf96-f6289b7108a5.pdf> (2023.8)。

19. Kitt, S., Axsen, J., Long, Z., and Rhodes, E., "The role of trust in citizen acceptance of climate policy: Comparing perceptions of government competence, integrity and value similarity," *Ecological Economics*, Vol.183, Article 106958 (2021) . DOI: 10.1016/j.ecolecon.2021.106958





污水處理廠 AI 智慧化管理 與維護的永續發展

關鍵詞 Keywords

- # 污水處理廠 Wastewater Treatment Plant
- # AIoT Artificial Intelligence of Things
- # 智慧化操作 Smart Operation
- # 能耗優化 Energy Consumption Optimization
- # 永續管理 Sustainable Management

國家科學及技術委員會
中部科學園區管理局

副局長
施文芳

台灣世曦工程顧問股份有限公司
中區工程處

資深協理
鄧建華

副理
黃宗富

計畫經理
許自初

工程師
陳其俞



面對極端氣候、水資源短缺與 2050 淨零排放政策推動，臺灣各地污水處理廠正從仰賴人員經驗與固定參數設定的傳統操作模式，逐步邁向結合人工智慧 (AI) 與物聯網 (IoT) 之 AIoT 智慧化運轉。AI 導入的核心在於建立資料驅動決策機制，透過感測資料、模型學習與預測控制，實現能耗優化、精準加藥及維護自動化之目標。

本文以科學園區污水處理廠 (圖 1) 為研究案例，探討 AI 智慧化系統於導入初期之應用模式、驗證方法與初步觀察成果。研究採用 AIoT 智慧管理雲平台整合 SCADA 監控系統，並運用時序預測模型及狀態基礎維護方法進行驗證性測試。結果顯示，AI 系統可在不干擾現場操作的前提下，提供負荷預測、能耗分析與異常警示等功能，展現自動化決策雛形，未來若能結合資料標準化與跨廠模型共享，將有助於推動污水處理廠邁向智慧化與低碳永續之新階段。



壹、前言

近年來隨著臺灣都市化、產業轉型及擴大高科技產業投資的加速發展，污水處理系統面對的進流量與水質常有大幅度變動，對操作穩定性與能耗控制造成雙重挑戰。傳統操作模式多仰賴操作人員經驗與

固定參數設定，當面臨流量及水質突變時，常出現曝氣過度、加藥過量或反應遲滯等問題，不僅提高營運成本，也影響放流水質的穩定性。

在 2050 淨零排放與 ESG 治理架構下，污水處理廠的營運思維正由「被動監測」轉向



圖 1 科學園區污水處理廠
資料來源：本文彙整

「智慧決策」。隨 AIoT 技術逐漸成熟，使廠區得以透過感測器、雲端平台與演算法分析並形成閉環系統，逐步朝向智慧化操作與維護發展。

內政部國土管理署已推動「污水下水道資料整合雲平台」與「微型智能化專家系

統」，建構跨廠資料整合與智慧監控架構，透過資料可視化與 AI 演算法驗證，促進 AI 技術於公共污水處理設施的導入與測試。其中「資料整合雲平台」負責全國污水處理資料彙整與決策支援，而「微型智能化專家系統」則運行於廠區邊緣端，以知識推理與 AI 模型輔助即時操作判斷，形成中央雲與現場智慧節點相輔的治理模式。

在此政策背景下，某科學園區污水處理廠自今年起啟動 AI 智慧化導入試驗計畫，採用「非侵入式驗證」模式，由 AI 系統透過邊緣運算與雲端推論進行資料學習、趨勢預測及控制建議。系統運作內容包括 AI 精準加藥控制、感測器防禦演算法及能耗優化排程，並以數位儀表板呈現即時監控與決策建議。

此導入計畫旨在驗證 AI 於實際污水處理流程中之可行性、穩定性與潛在效益，並探討其在節能減碳、藥劑給量及永續運維上的應用潛力。



貳、AI 智慧化架構與應用

隨著人工智慧 (AI) 與物聯網 (IoT) 技術快速發展，污水處理廠的控制模式正由「監測導向」逐步轉型為「決策導向」。AIoT 智慧化系統的核心概念在於以資料驅動取代經驗控制，使操作決策能即時、精準並具自我學習能力。其整體架構可區分為三層：感知層、分析層與決策層，三者透過資料傳輸與控制訊號回饋形成閉環循環，實現「感知、分析、決策、優化」的智慧運轉機制 (圖 2)。

一、感知層 (IaaS) 即時資料獲取與品質保證

感知層為 AI 智慧化系統的基礎，主要負責蒐集廠區內各單元即時運轉資料。其涵蓋

監測項目包括流量、水位、溶氧 (DO)、pH、氧化還原電位 (ORP)、導電度、溫度、能耗及設備振動等。資料透過工業通訊協定 (Modbus、EtherNet、LoRa、5G) 傳輸至邊緣閘道 (Edge Gateway)，再彙整至資料湖 (Data Lake)，形成可追溯、可比對之統一資料集。

為確保感測資料正確性與完整性，系統設有自動校正與異常補值機制。當感測器輸出出現跳值、遺漏或長期漂移時，AI 模組會依據歷史趨勢自動補值，並同步發出維修警示，以確保資料品質穩定。

另一方面，資料清洗 (Data Cleansing) 與特徵化 (Feature Extraction) 程序則於閘道端完成，藉此降低雲端運算負荷與延遲時間，並提升資料處理即時性。經由感測

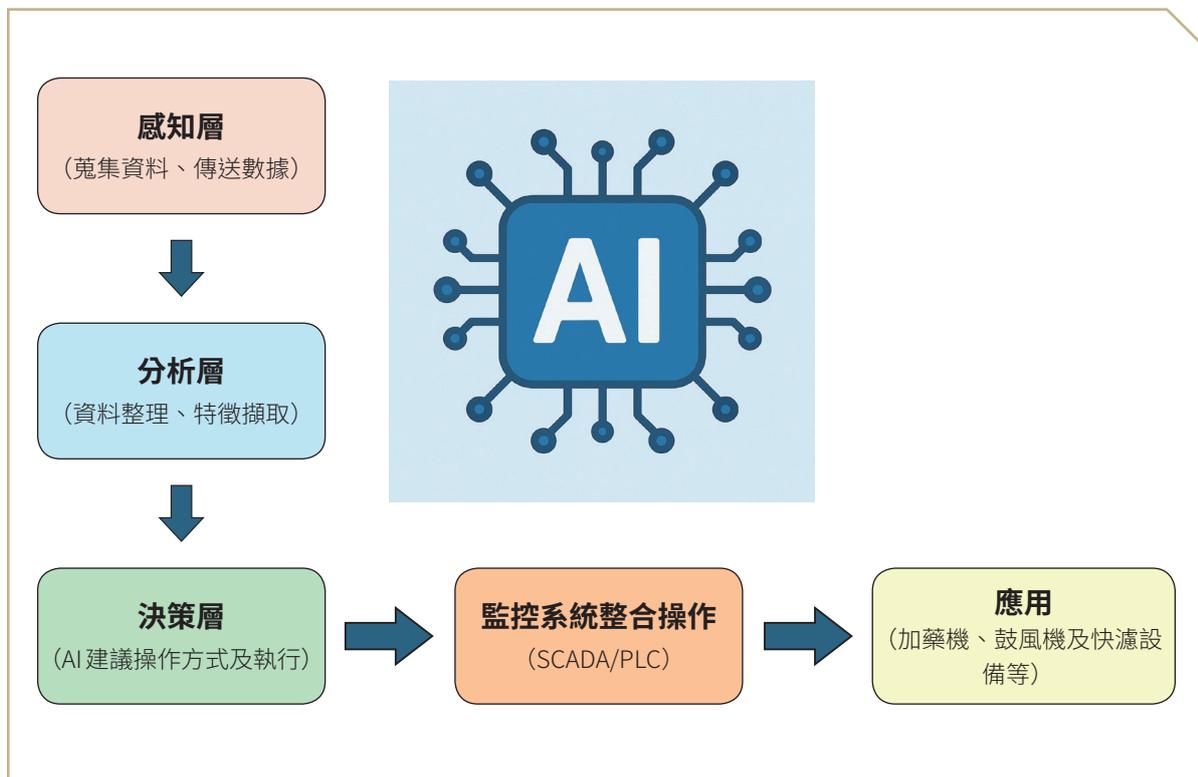


圖 2 AI 智慧化架構
資料來源：本文彙整

層所建構之高品質資料，後續 AI 模型的訓練與預測分析方能具備穩定且可靠的基礎。

二、分析層 (SaaS) AI 模型運算與知識生成

分析層為 AI 智慧化架構的核心中樞，主要負責資料整理、特徵擷取、模型訓練與決策生成。此層透過雲端運算與邊緣運算結合，實現即時資料分析與動態知識更新，使 AI 系統具備自我學習與預測控制能力，功能可分為四大類。

(一) 時序預測模型 (LSTM / GRU)

在分析層中，AI 系統主要採用長短期記憶網路 (LSTM) 與門控循環單元 (GRU) 兩類時序預測模型。LSTM 具備記憶門控結構，可長時間保留歷史資訊，適用於流量、水質濃度及能耗等長週期趨勢分析；而 GRU 則以簡化的門控設計降低計算複雜度，能快速完成短期預測與即時控制。兩者相互搭配，使系統能同時兼顧長期趨勢辨識與短期變動反應，提升整體預測準確度與操作效率。

(二) 迴歸分析模型 (MLP / Random Forest)

多層感知器 (Multi-Layer Perceptron, MLP) 與隨機森林 (Random Forest) 模型可透過學習大量歷史運轉資料中各變數間的非線性關聯，建立能耗、藥劑使用量與曝氣需求等多目標預測模型。此類模型具備多維度特徵選取與關聯分析能力，能即時預測各單元運轉趨勢，並提供操作員平衡能耗、藥劑投加與出水品質的最佳化建議。此外，系統亦可依模型結果自動生成決策參數，支援智慧化操作控制。

(三) 影像辨識模型 (CNN)

卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 具備優異的影像特徵擷取與分類能力，於污水處理領域中可應用於顯微影像及紅外線熱成像分析。透過影像辨識模型，系統能自動解析污泥絮體結構、曝氣均勻度與設備表面溫度分布，進而判斷污泥膨脹、管線堵塞或設備過熱等潛在異常狀況。此技術可有效取代傳統人工目視檢測，提升維護效率與設備健康監測精度，並可與 AI 預測維護模組整合運作，形成完整的智慧診斷機制。

(四) 智慧控制模型 (Fuzzy Logic / Reinforcement Learning)

智慧控制模型為 AI 智慧化應用的核心技術，藉由即時感測資料輸入與回饋學習機制，能動態辨識系統操作條件與負荷變化。

模糊邏輯控制 (Fuzzy Logic) 可模擬人類專家的判斷思維，將連續水質參數轉換為可操作的控制決策，以應對高不確定性與多變環境；而強化學習 (Reinforcement Learning) 則透過試算與回饋修正控制策略，使系統在不同負荷條件下皆能維持最適化運轉，兩者整合可實現自適應控制 (Adaptive Control)，形成具智慧決策與自我修正能力的閉環運作模式。

三、決策層 (PaaS) 智慧控制與安全執行

決策層是 AI 智慧化架構的執行中樞，負責將分析結果轉化為具體的操作行動。AI 系統會根據模型輸出結果，提供操作建議 (如風量、加藥速率、回流比)，並透過人機介面 (HMI) 或監控系統 (SCADA) 進行審核與執行。

為確保操作安全，AI 決策導入採「三階段模式」：

(一) 建議模式

AI 系統僅依據即時資料進行預測與分析，提供操作建議供人員參考，最終控制決策仍由操作人員人工審核與執行。

(二) 半自動模式

系統依據模型運算結果提出控制建議，經操作人員確認後自動執行相應操作指令，兼具 AI 輔助與人工監督特性。

(三) 全自動模式

當模型信心度高且系統運行環境穩定時，AI 可自主下達控制指令並即時調整操作參數，形成全閉環之智慧控制架構。

四、AI 與污水處理流程之整合模式

AI 系統導入後，會依據污水處理流程中各單元的運轉特性進行模組化整合，透過資料回饋與預測控制形成閉環運作機制，使各單元得以協同運作並自動調節最佳化參數。其整合模式如下：

(一) 進流與調節池單元

AI 利用歷史流量及氣象資料進行短期進流負荷預測，提前調整抽水泵浦頻率與水位控制策略，以降低瞬時衝擊負荷對後續單元的影響。

(二) 混凝與加藥單元

AI 透過濁度、UV254 及氧化還原電位 (ORP) 等即時指標判斷水質變化，自動調整藥劑投加速率與比例，避免過量投藥並維持最佳混凝效率。

(三) 生物處理單元

系統持續監測溶氧 (DO)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 及能耗等運轉參數，並透過強化學習模型自動調整曝氣風量、迴流比與污泥齡，達成有機污染物去除效率與能源消耗間的動態平衡。

(四) 二級沉澱與過濾單元

AI 依據濁度及污泥界面高度變化，預測污泥膨脹或沉降異常，並即時修正迴流與排泥速率，以確保出水穩定。

(五) MBR 膜濾單元

系統監測跨膜壓差 (TMP) 與通量變化趨勢，藉由預測模型判定膜污染程度，並自動啟動反洗或化學清洗程序，維持長期穩定通量。

(六) 放流與再利用端

AI 持續分析餘氯、導電度與濁度等監測資料，確保放流水符合排放及再利用標準，並於偵測異常時回溯前端單元運轉參數，進行自動修正與溯源調整。

五、資料治理與跨廠整合應用

AI 智慧化系統的核心價值在於資料品質與治理。各廠資料依「WAI-Exchange (Water AI Exchange)」標準進行統一管理，確保跨系統、跨廠間的資料一致性與可共享性。該標準規範感測資料、運轉參數與能資指標之結構、單位與時間基準，並要求資料具備時間戳記與版本控管，以確保可追溯與可比對。透過此機制，AI 模型可於不同廠區間共用資料，提升訓練效率與分析精度。

為兼顧安全與即時性，系統採「邊緣運算 (Edge AI)」與「零信任 (Zero Trust)」雙重架構：前者於現場端即完成運算，降低雲端延遲；後者則透過身分驗證與加密通訊防止外部入侵。經由雲端平台整合後，各廠分析成果可匯入跨區域能資績效資料庫，提供主管機關作為策略優化與永續評估的重要依據。此舉不僅提升整體系統運轉效率與能資管理精準度，也為後續推動全國性智慧水務雲的建置奠定基礎。

參、案例分析

本研究以科學園區污水處理廠處理流程導入 AI 試驗案例 (圖 3)，採分階段導入策略，目前因處於模型驗證與操作調適階段，故將以系統設計、導入重點及初步觀察為主。

本廠服務對象涵蓋半導體、光電與精密機械產業，為提升操作效率、穩定出水品質並響應節能減碳，並以節能與節藥為核心目標，預期可達每處理 1m^3 污水節電約 0.34 度電，相較傳統操作模式可降低能耗約 15% ~ 20%；同時 PAC 藥劑使用量每噸水可減少 0.0125kg，相當於年度藥劑消耗減少 1.5 公噸以上，展現明顯節能與減藥雙重效益。

為推動再生水政策與塑造具韌性之多元供水系統，刻進行原址改建及 MBR 膜濾系統且工程即將竣工，改建後處理量將由原 3.2 萬 CMD 提升至 5 萬 CMD，不僅可顯著改善出流水質，亦能滿足未來再生水回收與高階製程用水需求。相關新增之處理單元與設備皆預留 AI 智慧化整合介面，後續將導入 AI 模型進行藥劑自動控制、曝氣能耗優化及再生水水質預測，以達成高效能、低能耗之智慧化運轉模式。

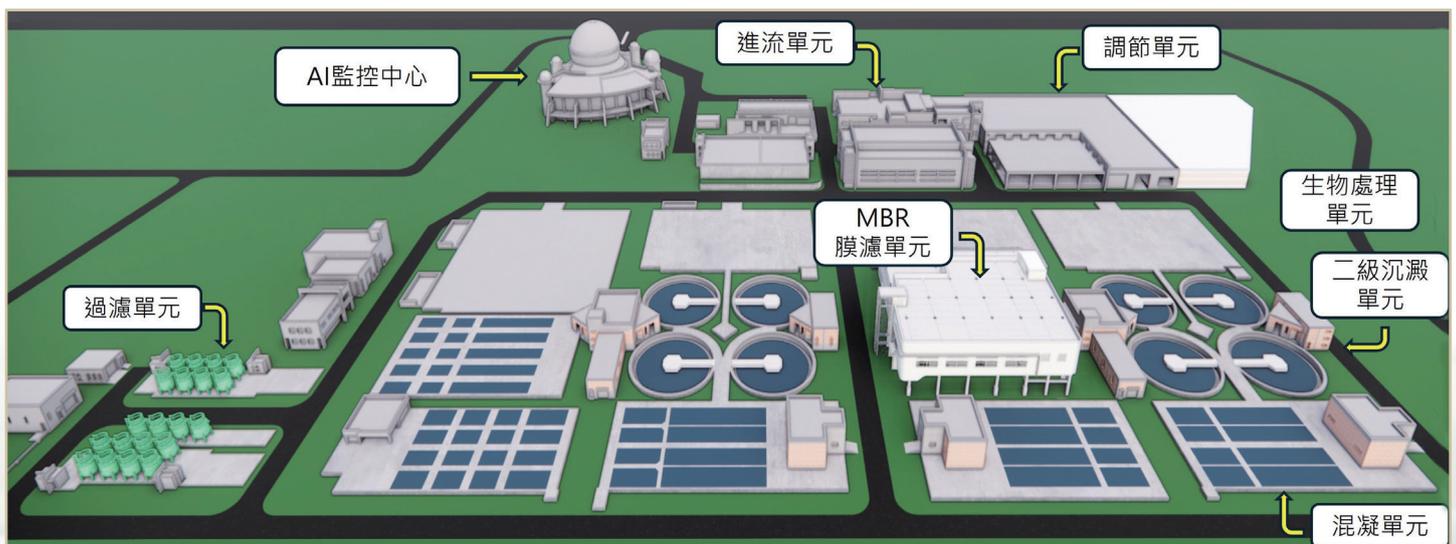
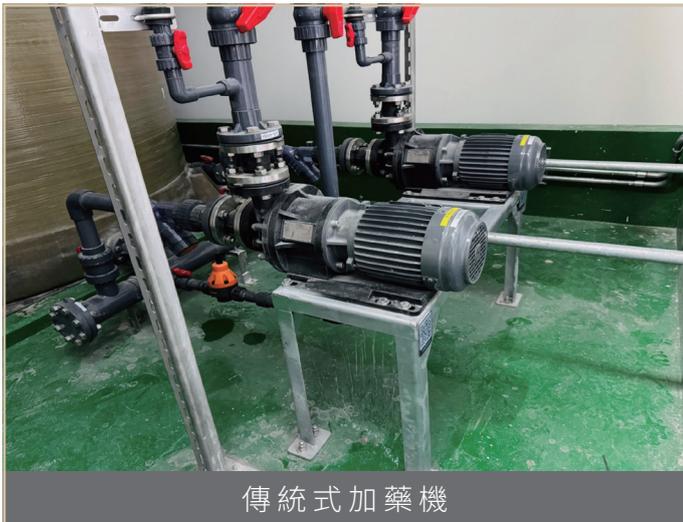


圖 3 科學園區污水處理廠各處理單元
資料來源：本文彙整

在導入 AI 前，廠區多採用傳統之後饋式加藥模式（圖 4）。此方式依賴操作人員根據水質變化及經驗進行人工調整，常出現反應延遲、加藥不精準與感測器受干擾等問題。當暴雨或工業廢水導致水量水質劇

烈波動時，過量或不足的增加藥皆會影響放流水質。此外，感測器易受污泥與氣泡附著，導致數據漂移與誤警，操作人員難以判定為水質異常或儀表故障，進而增加操作風險。



傳統式加藥機

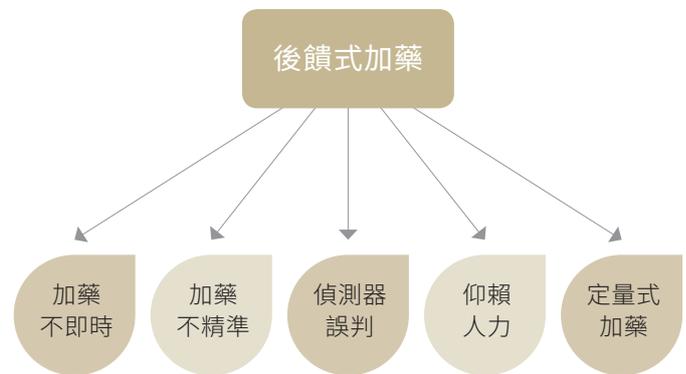


圖 4 後饋式加藥架構
資料來源：本文彙整

藉由 AI 系統導入建構三項核心功能：

一、AI 水質智慧監測與精準加藥系統

透過深度學習模型即時分析濁度、pH、溶氧 (DO) 及懸浮固體 (SS) 等關鍵水質指標，系統可自動提供最佳加藥建議值並執行遠端控制，有效提升藥劑使用效率與出水穩定度。

二、AI Sensor 防禦系統

應用異常偵測演算法即時修正感測器漂移與量測誤差，確保監測資料準確性與可信度，維持整體感測網路穩定運作。

三、AI 節能優化系統

結合電力監控資料，分析鼓風機等主要設備之能耗行為，藉由 AI 模型優化反洗週期及設備運轉排程，達成能源使用效率化與節電效益提升。

由於目前仍屬資料學習與模型驗證階段，實際效益尚待長期觀察。初步模擬推估，若模型信心度持續提升且運行環境穩定，預期可達藥劑使用量降低約 15%-20%、電力消耗節省約 10%、污泥產量 (年) 減少約 10%。此外，AI 對濁度、SS 及化混池加藥反應時間的自我調整，將有助於放流水 SS 維持於 20mg/L 以下 (環保法規標準 30mg/L)，顯著提升水質穩定度。

肆、AI 導入效能與永續性分析

一、即時監測與資料透明化

本廠導入 AI 系統後，透過 SCADA 與 AI 雲端平台整合（圖 5），操作人員可即時於儀

表板監控流量、DO、ORP、能耗等多維度資訊，並可回溯異常時段資料進行追蹤分析。此高頻資料流將使操作資訊更透明化，並作為建立模型訓練與效能比對的共同資料基礎，為後續 AI 優化奠定關鍵。



圖 5 AI 系統與 SCADA 系統整合
資料來源：本文彙整



二、能源管理與碳排趨勢

AI 智慧控制雖尚未全面取代人工操作，但在曝氣單元的控制試驗中已展現潛在節能效益。AI 模型可於 DO 預測與鼓風機頻率調控上自動提出最佳化建議，使曝氣系統運轉更穩定並減少不必要的能耗。

同時，廠內之快濾設備亦導入 AI 輔助控制模組，透過即時比對濁度、壓差與反洗頻

率等運轉參數，能自動判斷反洗時機與用水量，避免過度清洗造成的電能與水資源浪費，進而提升整體能源使用效率。

此外，廠區已建立能耗監測與歷史資料比對機制，可定期分析各單元用電趨勢與負載變化，作為後續能源管理與節能策略優化的依據，逐步朝向精準化能源調控與低碳運轉方向發展（圖 6）。

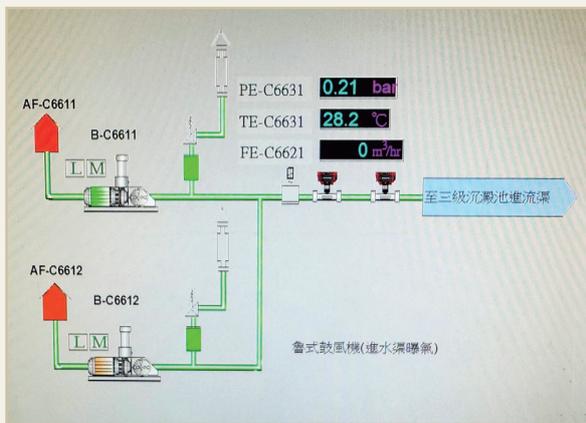


圖 6 設備狀態與能耗監測
資料來源：本文彙整



三、預測性維護與資產健康

AI 系統結合振動頻譜、軸承溫度與電流波形等參數建立設備健康指標，可提前發現異常趨勢並預警維護時機。AI 模型可於設備異音或震動異常前提出警示，避免突發停機情形，逐步導入狀態基礎維護（CBM）策略，使維護工作更具預見性與效率。

四、知識管理與人員能量轉型

為促進操作知識傳承，未來將建立數位孿生模擬平台，用以模擬不同進流負荷與氣

候情境。操作人員可於虛擬環境中進行異常演練與操作模擬，觀察系統反應與能耗變化，將現場經驗轉化為可量化的知識資料。此舉不僅縮短新人訓練期，降低維運成本，也使操作角色逐步轉向「監督與決策支援」。

五、永續治理與 AI 導入績效架構

為持續追蹤 AI 導入成效，本研究建議建立 AI 永續評估系統（AI-based Sustainable Evaluation Framework），作為後續效能檢核與決策依據，涵蓋四個面向：

(一) 能源強度

監控節能成果與尖峰負荷削減成效。

(二) 出水穩定性

量化 AI 控制下的水質穩定度。

(三) 維護績效

追蹤設備可靠度與修復效率。

(四) 透明治理

評估資訊揭露與公眾滿意度。

各項指標可依季度滾動檢視，形成「監測、評估、回饋」循環機制，支援永續營運決策。

綜整而言，污水處理廠 AI 導入雖仍處於試驗階段，但已建立智慧監測、預測維護及能資管理等核心基礎。隨著資料持續累積與模型精進，預期未來可於全廠層級實現動態能耗調控、加藥自適應控制與異常自我修正機制，達成節能減碳與長期穩定運轉之雙重目標。

柒、結論

本研究探討 AI 智慧化系統於污水處理廠導入初期的應用模式與實際效益。根據研究結果顯示，AIoT 雲端平台整合 SCADA 監控系統後，能有效提升資料即時性、監測透明度與操作效率，並促進廠區由傳統經驗式管理轉向資料驅動決策。

在系統效能層面，AI 模型可根據 DO、濁度、pH、SS 等關鍵指標自動提供操作建議，穩定出水水質並減少人為誤差；同時節能優化模組整合電力與運轉資料，協助

調整設備運行，提升整體能源使用效率。AI 健康監測機制與狀態基礎維護 (CBM) 亦強化設備可靠度，降低突發停機與維修成本。

同時，本廠第二期改建增設 MBR 膜濾系統，將原處理量由 3.2 萬 CMD 提升至 5 萬 CMD，除可提升出流水質以因應再生水利用需求外，未來並將導入 AI 模型進行跨單元智慧控制。藉由 AI 即時分析膜通量與污染趨勢，可優化反洗時序與能耗分配，實現「AI+MBR」雙核心協同運作，達成高水質、低能耗之永續營運模式。

在管理效能面，數位孿生平台使操作人員得以於模擬環境中進行訓練與演練，累積經驗知識並強化決策能力，達到知識管理制度化與人員能量轉型的目標。此舉不僅縮短新進人員的學習曲線，也使操作角色逐漸轉向監督與決策支援導向。

整體而言，污水處理廠 AI 智慧化的導入，不僅顯示出即時監測、節能優化及預測維護等多層面成效，更代表台灣污水處理事業正邁入以智慧決策、數據治理與永續管理為核心的新階段。未來隨著資料累積與模型成熟，AI 可望全面應用於加藥自適應控制、能耗動態調節及異常自我修正等系統層級，進一步提升整體運轉效能與碳管理能力，成為推動我國水務智慧化與淨零轉型的重要示範場域。

參考文獻

1. 楊博丞、莊博鈞、高昱誠、林佑璇，「下水道系統智慧管理：廠站維護與管理」，下水道再生水期刊，第三卷，第二期，第 1-14 頁 (2024)。

AI 驅動營建轉型——以樂善安居社宅數位雙生平台為例

關鍵詞 Keywords

數位雙生 Digital Twin

建築資訊模型 BIM

人工智慧 Artificial intelligence (AI)

V3DM 平台 Visual 3D Facilities Maintenance Management Platform

台灣世曦工程顧問股份有限公司
北部營建工程群

副總經理

林聰能

營建工程部主任

協理

黃寶翰

副理

王冠文

計畫工程師

黃希達

工程師

邱哲誼

工程師

陳柏融



本文以桃園市「樂善安居」社會住宅工程為例，探討於營建工程中導入人工智慧 (Artificial intelligence, AI) 與數位雙生 (Digital Twin) 技術，強化建築物基礎開挖階段之安全監測與管理，且應用 BIM 模型、IoT 感測器與自動化監測設備，透過 V3DM 平台即時整合並視覺化呈現施工現場數據。系統能即時顯示支撐應變及水位變化等監測值，當到達安全警戒值時發報預警，提升工地風險控管效率與透明度。

平台亦支援 3D 圖像化操作與警示通知功能，幫助管理者快速掌握現場狀況，做出即時決策。此數位整合應用展現出減少人力成本、提升決策效率與跨部門資訊協作之多重效益。未來可應用於其他安全監測像是土中傾度管，結合 AI 預測模型，並延伸建築營運維護階段等，推動營建產業智慧化與永續發展。



壹、前言

在建築工程的施工作業，基礎開挖過程可謂最具風險之階段，隨著土層開挖，側向土壓力及水壓力不斷累積，使擋土壁及內部支撐承受應力隨之提升，若監測與管控措施不足，未能防範未然及避免衍生災變損失擴大。近年來，國內屢見因開挖擋土失敗而導致的重大災變，不僅造成民眾生命、財產龐大損失，更因登上社會新聞版面，對公共安全與營建產業形象構成嚴峻挑戰。因此，如何有效掌握施工現場變化，並及早預警潛在風險，已成為亟需解決之課題。

然而，人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 技術近年快速崛起，於資料分析、模式辨識與預測決策等領域展現強大實力，考量營建產業施工過程變化性高，若能善用 AI 技術結合建築資訊模型 (BIM)、物聯網 (IoT) 與數位雙生 (Digital Twin) 等技術，將可突破傳統施工監測採人工紀錄等待報告之資訊空窗期、人工判讀延遲，及監測記錄紙本留存方式不易調閱等限制，實現即時監測、智慧判斷與風險預警之創新管理模式。

本文以桃園市龜山區「樂善安居」社會住宅基礎開挖工程為例，探討 AI 驅動之開挖安全監測資訊整合數位雙生平台之應用，並分析其在提升工地安全、資訊透明度與數位轉型上之效益與未來展望。

貳、工程概述

一、工程背景

桃園市自 2014 年升格為直轄市，作為北部地區發展迅速的城市，是少數呈現人口快速成長，住房需求激增，卻遭遇近年來房價不斷提升，因此配合政府「安心住宅計畫」，推動只租不售的社會住宅政策，發揮租屋市場與購屋市場相互調控的市場均衡機制，對穩定住宅市場與安定人民居住，具有重大意義。

二、基地環境

(一) 地理位置

本案桃園市「樂善安居」社會住宅基地位於龜山區，西側鄰接蘆竹區及桃園區，屬於桃園市最東側的分區，以緊鄰新北市的林口國道一號分界，東南側則以壽山路及青山路銜接新莊、樹林、泰山等新北市區位。雖基地周圍景觀綠地環繞，景觀良好無視野阻擋、鄰近新莊、林口市區而不吵雜，距桃園捷運 A7 體育大學站約 2.2 公里 (圖 1)，但位處林口台地邊緣地段，仍有因地勢高程上邊坡穩定之施工疑慮。

(二) 基地地質

基地地質條件，厚度約 0 ~ 3.5m 的回填層及紅土層，3.5m 以下為卵礫石層，地表下大約分 2 ~ 3 個層次，如圖 2，地下水位約地表 25m 深度以下，但仍有因地表強降雨導致地下水位劇烈變化的風險。本計畫預計開挖深度約 12.1m ~ 14.1m，經評估擋土樁依現地高程採用 H 型鋼樁工法施作，再搭配水平內支撐系統作為擋土支撐設施，最具安全及經濟效益。



圖 1 樂善社宅基地周邊位置圖



圖 2 基地周邊地質鑽探位置及地層分布圖

(三) 基地特性

本案基地西側緊鄰空地現作為建材堆置場，北側鄰接道路後接續山坡地形、南側則為滯洪池後持續向溪谷傾斜，如圖 3，興建社會住宅工程為地下三層，地上十四層，一幢四棟鋼筋混凝土結構體，基礎型

式為筏式基礎，深度約 12.1 ~ 14.1m，基地開挖擋土採用 H 型鋼+內支撐工法，如圖 4。故於地下室開挖施工階段，需確保基地高程差應力分佈、周邊道路與建物不受損壞，開挖過程安全並兼顧施工效率，對於開挖擋土及支撐工法選擇、監測設施佈設及防止邊坡滑動實為重要課題。



圖 3 本案基地位置

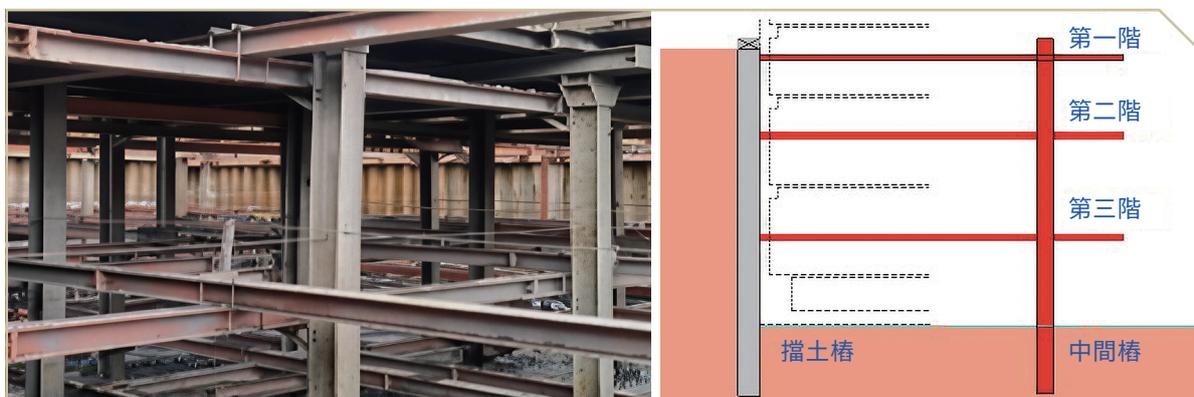


圖 4 水平支撐工法示意圖

三、基礎工程監測

地下開挖施工最常造成災害發生之時機點為地下水抽取與土方開挖解壓，因此本案專管團隊在規劃設計階段實施規劃之施工風險評估，即辨識及掌握地下開挖支撐、拆撐之風險。近來重大工程建設多位於人口稠密處，一旦發生災害，善後處理勢必增加許多額外開支或延長工期，造成重大損失，故安全監測已成為施工必備項目。為降低風險，設置監測系統主要功能是量

測並記錄施工中所發生的各種變量，以防範各種潛在危害發生。

專管團隊藉由前期實施規劃階段之施工風險評估，再將風險傳遞於統包設計單位，經統包設計後，雙方研議導入本解決方案「開挖安全監測資訊整合數位雙生平台」以降低風險。專管團隊督導統包商建立施工規範，並由統包商擬定儀器規格、裝設、監測方法及緊急應變計畫，建構最具經濟效益之工程安全管理及控制策略。

參、開挖安全監測資訊整合數位雙生平台

基礎開挖施工期間，於支撐應變計及水位監測採自動化連續監測（圖 5），並與其他電子式監測儀器一併採用數位化遠端即時監控方式，將監測資訊同步於數位雙生平台，紀錄數值變化歷程，以掌握並降低風險。

一、本案開挖安全監測系統配置

（一）開挖範圍內觀測系統

開挖範圍內觀測系統配置有支撐應變計，目的是隨時能測知支撐系統軸力及應力分布情況，俾可分析支撐系統穩定及安全程度，以控制施工安全；中間柱隆起點，用以監測基地內因挖土後所產生之土壤解壓作用而造成基地內土壤隆起情形，以研判基地土層穩定程度（表 1 及圖 6）。

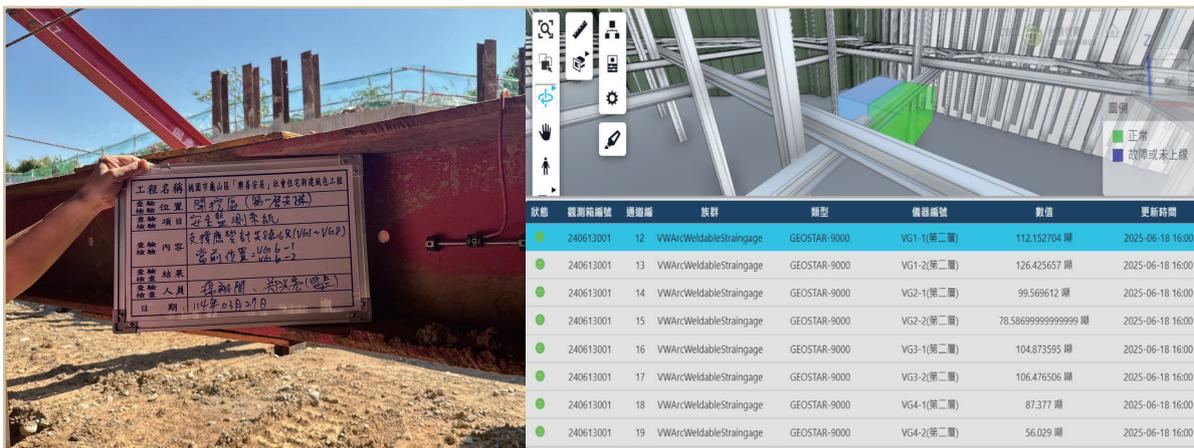


圖 5 自動化監測與數位遠端監控

表 1 開挖範圍內觀測系統

儀器名稱	符號	位置	數量	警戒值	行動值
支撐應變計	VG	二層支撐，每層 8 處 16 只	32 只	120 tf/ 支 125 tf/ 支	150 tf/ 支 160 tf/ 支
中間樁隆起點	CH	裝設於中間柱上	5 處	±4.0cm	±5.0cm

(二) 開挖範圍外觀測系統

開挖範圍外觀測系統配置有水位觀測計，深度 GL-20M，用以監測開挖中擋土壁外之水位變化及分布情況，並可藉以分析土層穩定度；水壓觀測計，深度 GL-20M，用以監測擋土壁外水壓變化及分布情況，並可藉以分析土層穩定度；土中傾度管，深度

約 16.7M，用以監測擋土壁外土壤位移及基礎土層之側向位移情形，以判斷基礎土層穩定程度；建物傾斜計，用以監測鄰房受工地開挖後所產生之傾斜變化情形，以研判鄰房及工地施工安全性；沉陷點，用以監測基地四周因開挖土壤變位及抽水所造成之沉陷變化程度（表 2 及圖 6）。

表 2 基地外觀測系統

儀器名稱	符號	位置	數量	警戒值	行動值
水位觀測井	OW	裝設於壁體外，深度 GL-20M	2 處	12hr 內驟升或驟降 2.0m	12hr 內驟升或驟降 3.0m
水壓計	PI		2 處		
土中傾度管	SO	裝設於擋土壁外（基地外），深度約 16.7M	7 處	3.4cm	4.0cm
建物傾斜計	TI	3 倍開挖深度範圍每棟建物設置	4 處	1/400 rad	1/300 rad
沉陷觀測點	SE	工地四周	26 點	±3.5cm	±5.0cm

(三) 自動化監測設備

其中攸關開挖安全需即時掌握施工過程引發之各種應變行為數據，包含支撐應變計、水位觀測井及水壓計，採用自動化監測，計有地下水位計 2 個、水壓計 2 個及支撐應變計於水平支撐每層 8 處、單層支撐每處 2 個，二層共 32 個，平面配置如圖 6，3D 配置如圖 7。相關監測數據與本案數位雙生平台系統串聯，並設定警戒值及行動值等管理值警報，若監測數據達預設之管理值時將觸發警報，系統會發送簡訊通報相關人員，以達到事前預警目的。

為節省大量監測人力，提高儀器數據可信度，自動化監測系統採用 GEOSTAR Model 9020 自動化數據集錄器（圖 8），其特點為系統核心採用進口資料擷取模組，穩定可靠；多台自動化數據集錄器組合可擷取數千組儀器數據；在任何地方皆可接收資料；使用專用分析軟體可建構完整之圖形監測系統。其系統架構為，感測器將量測資料給前置放大器作訊號放大處理後，經由 16 位元類比 / 數位轉換器（16 bit A/D Converter）將訊號調整為離散式型態，便於掃瞄器擷取，再透過資料處理設備將其顯現於電腦螢幕上或列印成報表。

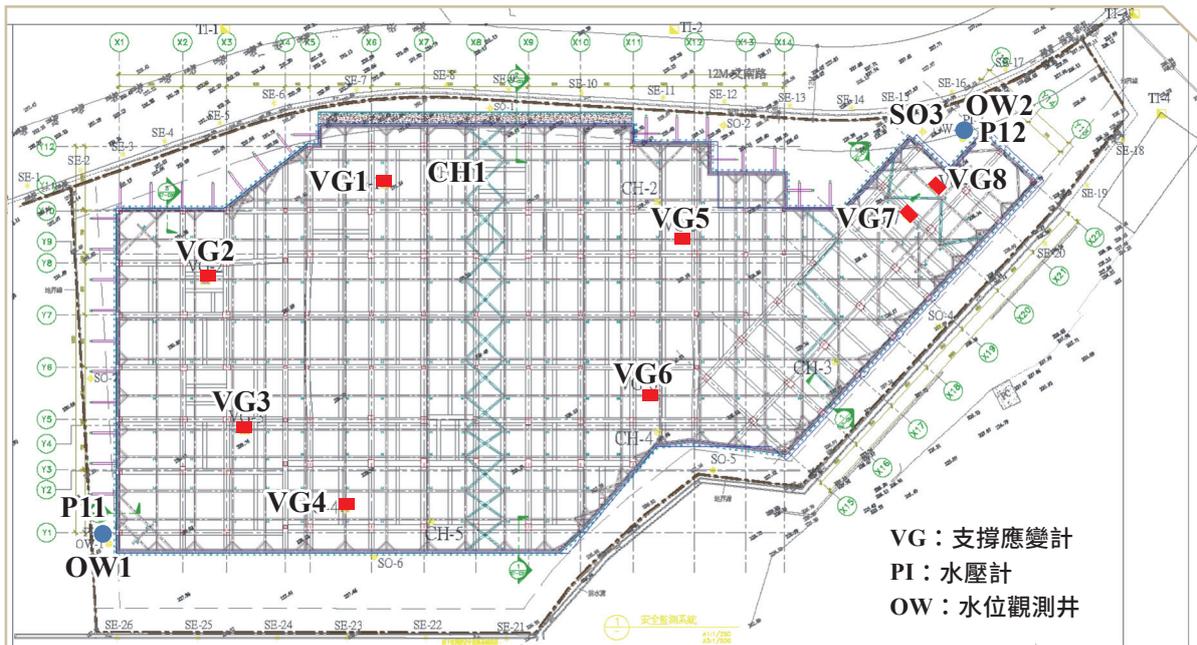


圖 6 自動化監測設備配置圖

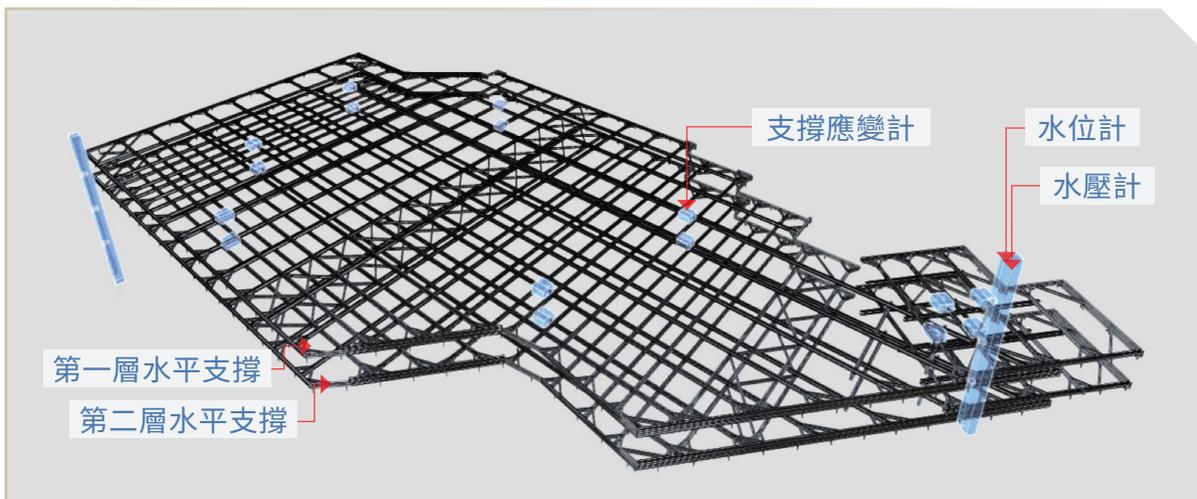


圖 7 自動化監測設備於 3D BIM 模型配置



圖 8 GEOSTAR Model 9020 自動化數據集錄器
資料來源：隼星科技

二、數位雙生技術

(一) 何謂數位雙生

數位雙生是現實世界的物理實體在數位平台上的虛擬「雙胞胎」，它通常是一種 3D 虛擬模型，可以模擬物體或系統運行狀態，並

通過資料和演算法預測未來行為（圖 9）。應用於智慧建築上可以監控建築物的加熱、通風、空調和照明系統，從而降低建築物使用成本。此外，透過數位雙生進行建築維護，可快速識別維修需求和解決方案建議（Kashettar，2023，參考文獻 1.）

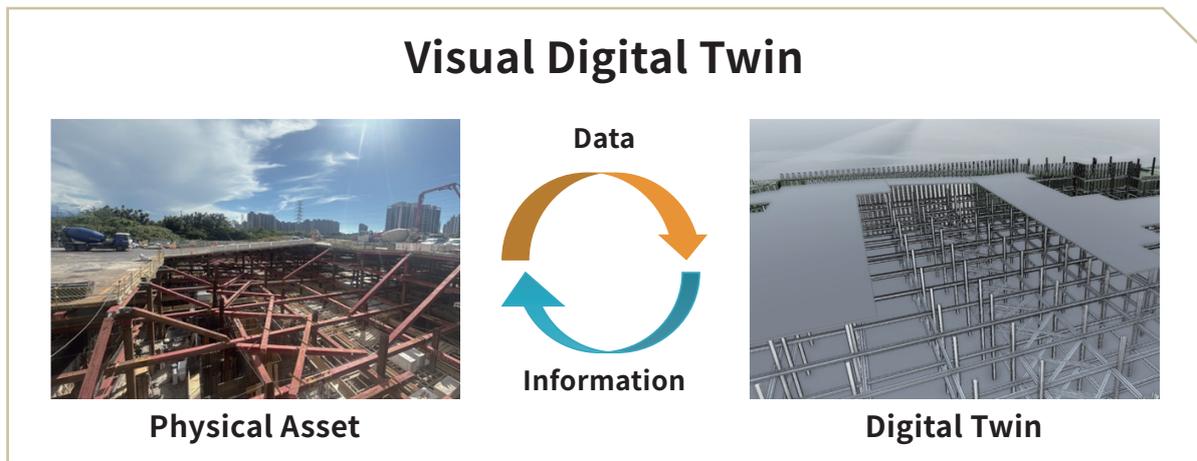


圖 9 數位雙生 (Digital Twin) 示意圖

(二) 數位雙生技術應用於地下開挖安全監測

國內外已有許多應用數位雙生技術於營建管理方面之成功案例，本案希望透過數位雙生技術，當發生監測示警時，除可透過平台得知發生位置，後續還能蒐集這些監測數據及天氣資訊，未來可進行預測，模擬當天氣變化有驟雨時可能會有示警之位置，以利協助工程管理單位提前應變。

三、監測資訊整合數位雙生平台

地下開挖為最易引發工程災變之階段，施工過程可能遭遇強降雨造成地下水位變化或土方開挖期間發生地震等災害。為預防潛在風險，監測系統主要目的在於即時量測與記錄施工過程中各項關鍵變量參數，藉以掌握結構及地層安全狀況。

結合前面「開挖安全監測系統配置」及「數位雙生技術」章節所述，為協助監造人員管理基礎開挖安全，本案運用開挖監測平台為 V3DM 數位雙生平台 (Visual 3D Facilities Maintenance Management Platform)，其平台由台灣世曦工程顧問公司 BIM 中心所開發，旨在提供一個基於 3D 視覺化之數據整合雙生平台，整合 BIM 模型及開挖安全監測數據，以應對開挖過程中之安全監控管理。

該系統能持續監控邊坡穩定情形，並透過自動化感測與資料擷取裝置，將量測數據即時傳輸至後端伺服器，形成連續且高時效性的監測資料庫。V3DM 數位雙生平台再從此系統擷取監測紀錄資料，作為後續分析與決策支援依據（蘇瑞育等人，2025，參考文獻 2.），圖 10 為自動化監測系統於 BIM 模型配置。

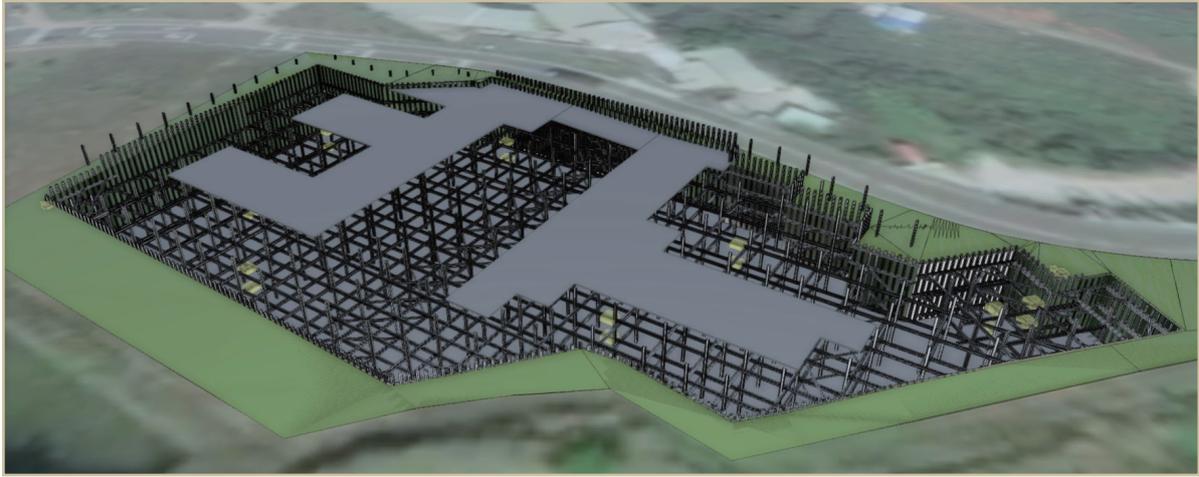


圖 10 自動化監測系統於 BIM 模型配置

(一) 平台應用情況

當監測數據超出警戒值時，通常被視為顯著之警示訊息。然而，在尚未達到警戒門檻前，數據中隱含的異常變化趨勢往往須仰賴經驗豐富之專業人員進行判讀。為提升異常辨識之效率與準確性，本案使用之 V3DM 數位雙生系統提供一套結合 3D 視

覺化介面之數據整合平台（圖 11），以輔助監造人員進行安全趨勢之判讀與決策。透過系統可於例行專技會議中檢視折線圖並分析監測數據之時序變化，掌握長期趨勢；於颱風、豪雨或地震等突發事件發生時，亦能即時檢閱關鍵監測指標，作為現場風險評估與應變判斷依據。

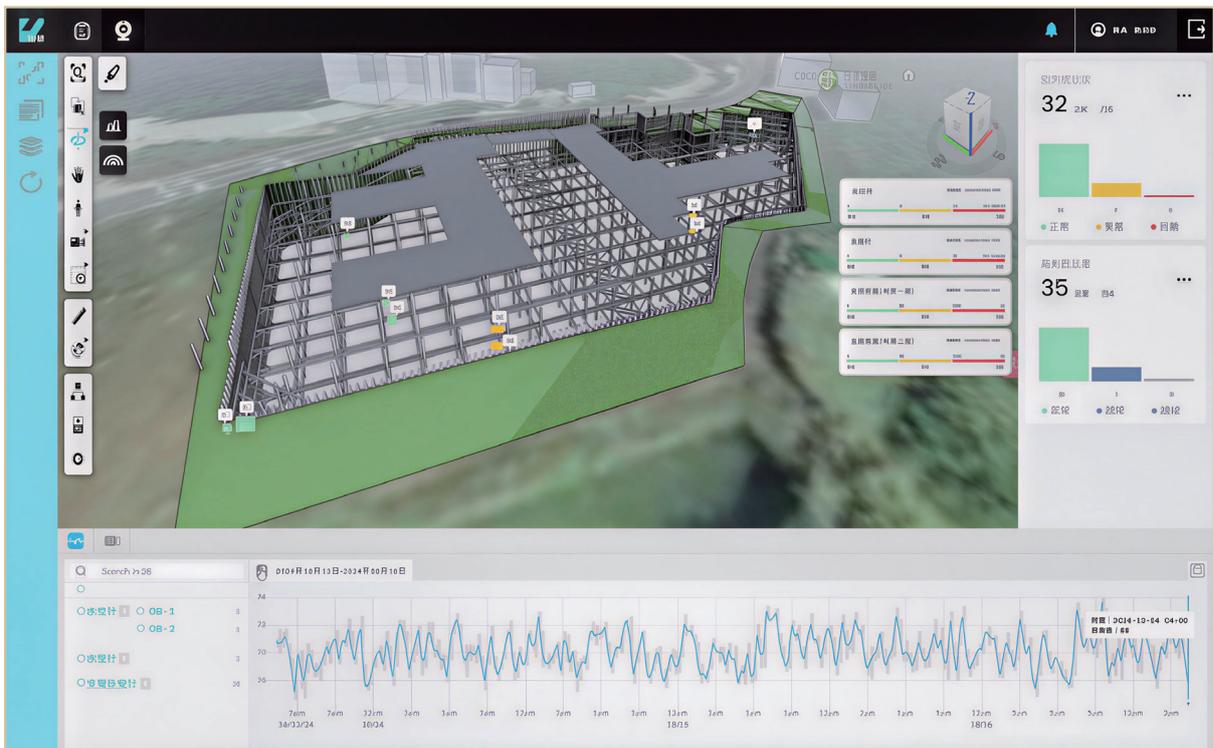


圖 11 工程開挖安全監測資訊整合平台

(二) 數據的空間化呈現

於 3D BIM 模型中，系統以醒目方式呈現數位感測器模型與其監測數據 (圖 12)，使用者能直觀掌握感測器於基地內之空間配

置與地理位置關係。感測器模型依據監測管理值範圍進行顏色區分，於安全範圍內顯示為綠色，超出警戒值或行動值時則分別顯示為黃色與紅色，以達到容易辨識、即時警示效果。



圖 12 3D BIM 模型監測值標籤及顏色標示

(三) 即時監測數據的快速獲取

系統提供監測數據與模型位置之串聯顯示功能。當使用者調閱串流資料 (包含感測器監測值、工地監視影像等) 時，可於模型顯示介面中將視角自動聚焦至對應之監測儀器模型元件 (圖 13)。協助使用者迅速

定位數據來源位置，明確辨識該監測資料於基地或構造物中的實際空間方位，提升監測資訊的可讀性與判斷效率。此外，使用者可啟用主動通知功能，當監測值達到預設警示門檻時，系統即時透過手機簡訊發送至相關人員，協助第一時間掌握工地監測狀況與風險變化。

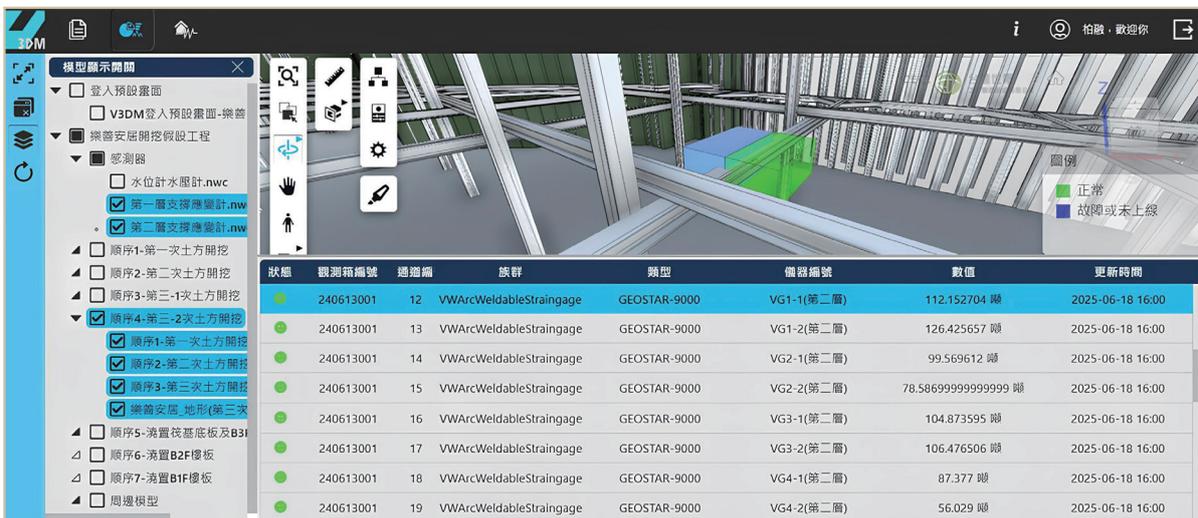


圖 13 監測儀器於 BIM 模型聚焦顯示

肆、數位雙生平台應用之效益探討與未來展望

一、效益評估

數位雙生技術整合於開挖安全監測平台，展現出高度整合性與即時性，對於施工安全監測、工程管理效率及永續發展均具有顯著成效。以樂善安居社宅工程為例，透過 V3DM 數位雙生平台整合 BIM 模型、IoT 感測器及 AI 數據分析，達成從現場感測、資料回傳、視覺化判讀至預警通知之流程自動化管理，不僅大幅提升資訊透明度，也改變了傳統工地管理依賴人力與經驗之運作模式。

(一) 降低專案成本

自動化監測免去傳統人力方式，需定期去量測，採用人工記錄，數據更新慢，需待人工判讀後才能得知狀況，無法立即發現潛在的危險。反觀使用 V3DM 數位雙生平台可即時獲得監測數值，隨時掌握監測狀況，無需人員在場，除降低人力成本支出外，另 V3DM 平台的工程開挖監測系統幫助即時預警潛在施工風險，減少因延誤造成工程災變的意外成本。

(二) 改善專案執行效率

傳統監測方式要等廠商產出報告，容易造成資訊延遲，且紙本文件調閱資料耗時，降低專案團隊之整合協作效率。V3DM 數位雙生平台促進了跨單位的資訊共享與協同決策，包含業主、專管監造及統包團隊可透過同一平台即時掌握現場監測情況，解讀趨勢，減少資訊落差與溝通成本，同時可調閱歷史資料。

(三) 提升決策能力與品質

V3DM 數位雙生平台可即時整合各項感測數據，並以 3D 視覺化方式呈現，像是颱風侵襲或豪雨等汛期期間，可協助施工監造人員快速掌握基地內各感測器狀態與變化趨勢（圖 14），當監測值出現異常時，系統能自動發送警示訊息，縮短決策反應時間，避免潛在災害擴大，此舉有效提升了監測精度與預警能力，使開挖工程的安全控管更加科學化與自動化。此外，因各項感測數據以資訊化留存紀錄，有助於將颱風侵襲或豪雨等事件，和感測數據與歷程進行比對，有助於提升決策品質及爾後類似案例之施工風險評估與趨勢預測。



圖 14 本團隊於「丹娜絲」颱風期間使用 V3DM 數位雙生平台掌握監測狀況

二、未來展望

數位雙生技術在營建領域具有極大發展潛力，後續可朝其他安全監測自動化導入像是土中傾度管、結合 AI 機器學習及建築生命週期其他階段應用等方向努力。

(一) 土中傾度管安全監測自動化之導入

本案基地開挖採用明挖內支撐工法，因此支撐應變計之數值變化狀況需即時掌握，若是採斜坡明挖工程，無內支撐設置，而土中傾度管之即時資訊就格外重要，當發生地震或連日豪大雨時，開挖範圍之土體可能發生變化，導致邊坡滑動甚至位移，若是採用定時監測再產出報告，可能無法即時掌握狀況，而錯過搶救時機。

(二) AI 機器學習之導入

將使平台具備預測分析能力，可根據歷史監測資料與氣象變化建立風險預測模型，提前辨識基地潛在異常區域，強化決策前瞻性。

(三) 建築生命週期其他階段之應用

數位雙生應不僅限於施工階段之安全開挖及回填拆撐監測，未來可延伸至建築營運維護階段，像是地震發生後，系統即時啟動數據分析，計算樓層間之變位角，評估建築整體結構健康狀態，快速識別損壞程度，實現從規劃設計、施工到運維之全生命週期資訊整合。

伍、結語

本文以樂善安居社會住宅為案例，透過導入 AI 驅動之數位雙生平台，實現施工階段安全監測資訊整合與智慧化管理。研究結果顯示，數位雙生平台能有效結合 BIM 模型、IoT 感測資料及自動化監測系統，提供即時監測、警報推播與 3D 視覺化輔助功能，協助管理者掌握現場狀況與異常趨勢，顯著提升施工安全性、資訊透明度及決策效率。此應用不僅展現 AI 與 BIM 技術於營建數位轉型之可行性，更為未來工地智慧化管理提供具體實證。

參考文獻

1. Swathi Kashettar., "Top 10 Use Cases of Digital Twin in the Year 2023" 網頁連結：<https://www.analyticsinsight.net/top-10-use-cases-of-digital-twin-in-the-year-2023/> (2023)。
2. 蘇瑞育、林志全、許瑋真、李怡瑤，「V3DM 數位雙生平台於社會住宅之實踐與展望」，中華技術，第 146 期，第 116-131 頁 (2025)。



T3 主航廈巨柱 與屋頂鋼結構施工解析

關鍵詞 Keywords

- # 巨柱 Mega Column
- # 鋼構可調式連接器 Tatekata, ACEUP
- # 軌道平台系統 Rail Platform System (RPS)
- # 鋼屋頂 Steel Roof
- # 桁架 Truss

台灣世曦工程顧問股份有限公司
T3

代理副總經理

黃金田

協理

宋建宏

經理

陳永儒

正工程師

邱旺德



桃園國際機場第三航站區之核心標 TP6A 包含主航廈、北登機廊廳、南登機廊廳及主航廈南北兩側聯絡航站南、北路等工程。於 2021 年 5 月，由三星物產 / 榮工工程股份有限公司組成之團隊得標。

主航廈的結構，分成三部分：鋼骨鋼筋混凝土 (SRC)、鋼筋混凝土結構 (RC) 及鋼結構 (SS)，而三樓版上的巨柱及屋頂桁架均為鋼結構。建築物之鋼骨鋼筋混凝土 (SRC) 及鋼結構 (SS) 的材料 (鋼板、型鋼或圓管) 均來自韓國浦項鋼鐵廠，主航廈的鋼構加工製造以在韓國製造為主，台灣為輔，工地安裝主要也是由韓國廠商負責，為跨國合作的案例。

本篇文章先敘述在巨柱材料與圓管製造、銲接、實體模型 (MOCKUP) 與預組立，再講述如何在工地利用軌道平台系統 (Rail Platform System, RPS) 搭配臨時支撐架 (Bent)，在三樓版吊裝巨柱、邊柱、主桁架及次桁架，完成屋頂桁架鋼結構的施工解析。



壹、主航廈屋頂鋼結構與巨柱構造

T3 主航廈（如圖 1），為臺灣桃園國際機場興建中的第三座航廈，其屋頂東西向長 414 公尺，南北向寬 242 公尺，主航廈的屋頂結構配合建築意象的屋頂造型，為波浪狀的桁架式鋼結構，上部為弧梁，下部為型鋼桁架，兩者交織組成，由中間兩排共 16 支巨柱與南北各 42 支邊柱傳遞應力到三樓樓板上。

T3 主航廈的巨柱（Mega Column）（如圖 2），底部中心距一長寬均為 9 公尺，室外 4 支巨柱（東、西兩側）19.54 公尺高，室內 12 支巨柱為 19 公尺高。藉此 16 支巨柱打造出更寬闊彈性空間，大跨距巨柱採擴座透空型式，形塑榕樹枝幹頂起天篷之意象，增加空間自明性及容易辨識出入境動線。



圖 1 T3 計畫 3D 圖（主航廈、聯絡道路、南北登機廊廳示意）

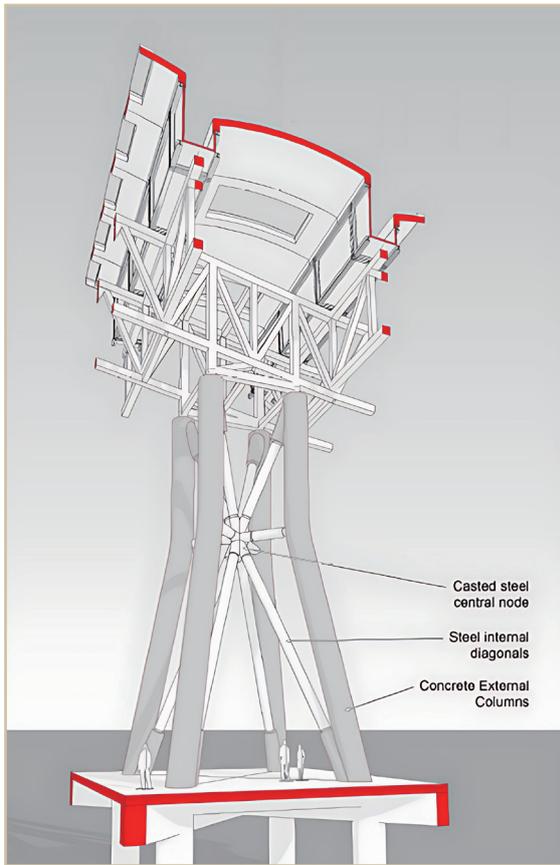


圖 2 榕樹狀巨柱剖面圖

16 支巨柱採南北對稱，南北間距 72 公尺、東西向間距 54 公尺，巨柱與屋頂平立面（如圖 3）。

每支巨柱的組成分成 4 部分，外圓管（管徑*管厚 815*65 釐米）、內圓管（管徑*管厚 660*50 釐米）、水平圓管（管徑*管厚 508*28 及管徑*管厚 355.6*20 釐米）及中心區節點鋼構 NODE（外徑長 3.5 公尺、寬 2.3 公尺，鋼板厚度從 28 釐米到 70 釐米）所組成。

因為海運的關係，鋼構加工成品受限於貨櫃的尺寸，巨柱或屋頂桁架在施工規劃及施工圖繪製，即已考慮此因素。所以每支鋼巨柱均分成 24 構件運送至工地安裝。

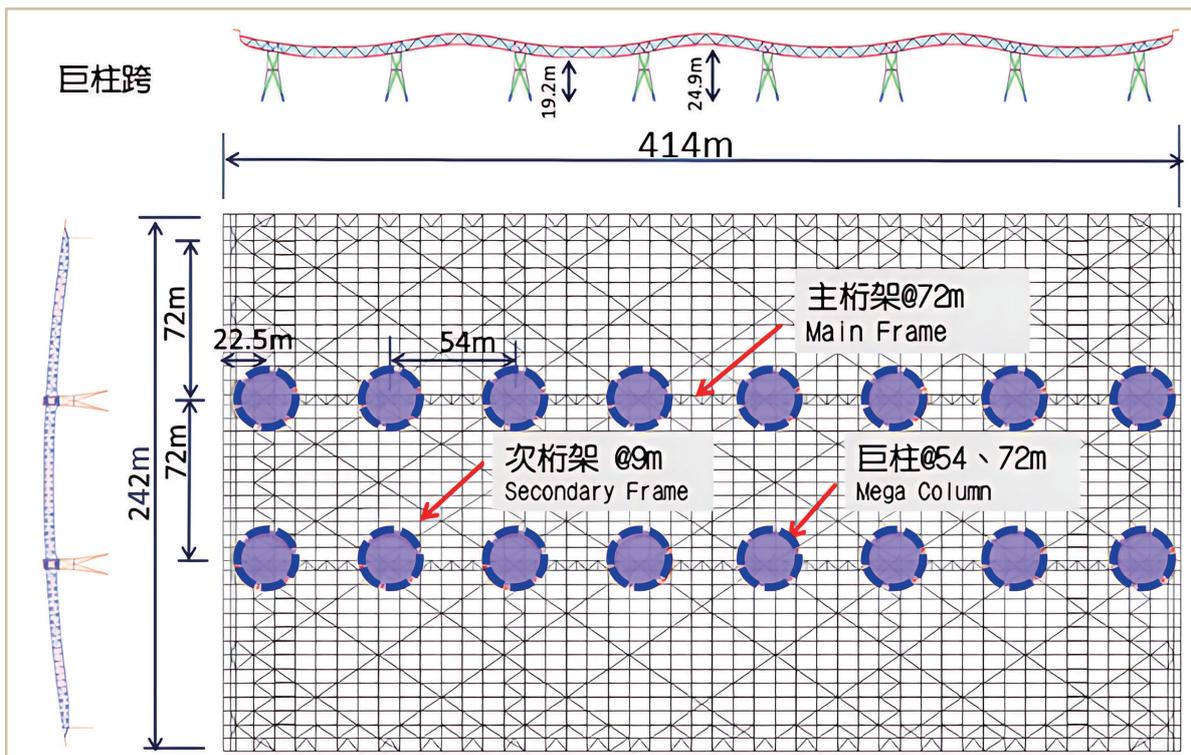


圖 3 巨柱與主桁架、次桁架平面分佈圖

一、巨柱的生產製造

針對巨柱的圓形鋼管的製造管理分工，

承攬廠商 - 三星物產與鋼構分包商「東星 (DSHI)」之分工如下 (圖 4)：

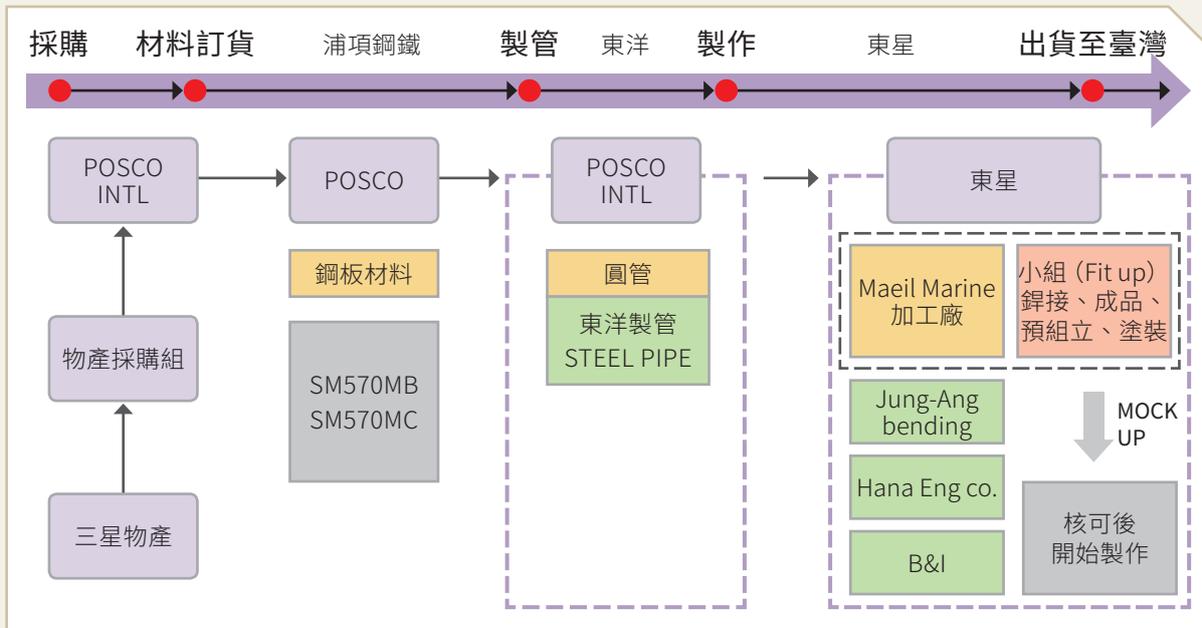


圖 4 巨柱的生產製造流程表

(一) 鋼板材料

本標開工於 2021 年 6 月，當時國內鋼結構生產製造正值高峰，要及時提供本標案 8 萬噸的鋼板材料並不容易，而韓國浦項鋼鐵廠 (POSCO) 在時程上可以滿足本計畫所需鋼材及生產製程，所以本標的施工團隊 (三星物產／榮工工程股份有限公司聯合承攬) 即以韓國浦項鋼鐵廠作為鋼板材料的主要提供者。

契約規定的鋼板材料其規格以 CNS 為基準，再加上中鋼對於 SM 鋼材之優化規定，但在韓國或國際貿易間甚少採用此種標準的鋼板規格，設計顧問監造團隊，於工程決標後至開工前階段即定期邀集第三航站區總顧問及施工團隊成員討論生產細節，

因為浦項鋼鐵廠曾製造日本規格 SM570 之鋼板，經評估可製造符合契約規定之鋼板 (表 1)，三星物產即確認由浦項鋼鐵廠供應。至於後續製造所需的檢驗標準，仍以設計圖、施工規範及 CNS 標準做管理，輔以國際通用標準 (如 JIS、ASTM 及 ISO)。

巨柱的鋼板材質為 SM570MB 及 SM570MC，材料取樣合格後，由專業製管廠商 - 東洋製管製做出符合 CNS 要求精度的成品管件，然後運送到韓國西南部的馬山 - 東星鋼構加工廠 (Maeil Marine)，進行構件裁切、小組、大組、銲接，最後進行預組立，再經過韓國第三方檢驗公司 (TUV) 及 CECI 之檢驗，完成巨柱的製造。

表 1 設計圖 SM570MB/SM570MC 的材料性質規定

適用範圍	鋼材規格代號	強度任性與品質增訂規格					銲接性與化性增訂規格			
		降伏強度範圍 Fy(Kgf/cm ²)	降伏比 YR(%)	Charpy 衝擊值 (J)	厚度方向 斷面縮率 (%)	超音波 檢測 UT	碳常量 Ceq(%)	冷裂感 指數 Pcm(%)	含磷量 P(%)	含硫量 S(%)
大梁	SM570MB	4,300~5,500	≤85% (t ≤ 40mm)	註 2	t ≥ 50mm , 3 個平均值: 25% 以上; 單一值: 15% 以上	JIS G0901 等級 Y(t ≥ 13mm) (註 4)	0.44 以下 (t ≥ 40mm) 0.46 以下 (t > 40mm)	0.29 以下	0.030 以下	0.008 以下
H, 箱型柱	SM570MC		≤85% (t > 40mm)		註 3					

- 註 1 SM570M 為依據 CNS 2947/G3057-92(JIS G3106-95)SM570 材質規格之修訂鋼板規格代號, 未特別增訂說明之性質仍需符合 SM570 之相關規定
- 註 2 SM570MB 之 CVN 值除滿足原 SM570 規定之 1/4 板厚位置之需求外 (47J, -5°C); 板厚 t ≥ 50mm 時, 增訂 1/2 板厚位置 CVN 值為 27J 以上 (-5°C)。
- 註 3 SM570MC 之 CVN 值除滿足上述註 2 之規定外, 柱內隔板以 EGW 或 ESW 等高入熱量銲接程序施作時, 其熱影響區需滿足 15J 以上 (-5°C)。
- 註 4 鋼板超音波檢驗須由原鋼板製造商施作並將檢驗結果標註於鋼板品質證明書。

(二) 巨柱圓管的製造

巨柱圓管成形後 (圖 5-6), 其真圓度需符合 CNS 的標準 (千分之一), 廠商使用符合圓管弧度的量尺檢測、確認。巨柱圓管在

其小組接合前完成精細的切割尺寸, 再回加工廠大組, 如圖 7-8 巨柱管件切割成品。



圖 5 巨柱圓管成形檢測一直徑



圖 6 巨柱圓管成形檢測一弧度



圖 7 巨柱管件切割成品一



圖 8 巨柱管件切割成品二

(三) 巨柱中央部 (NODE) 的製造

巨柱的中央部 (NODE)，共有 12 根圓管接入，結構分析上雖為一點，考量實際管的尺寸、加勁板的範圍，採用方形管再接上、中、下層各 4 根圓管所組成。步驟是先完

成內部加勁板，再做外部的箱板，然後銜接上、中、下鋼管，最後完成巨柱中心部件 (NODE) 的製造，如圖 9 (NODE 製作順序圖) 及圖 10—13 (NODE 組裝與成品照片)。

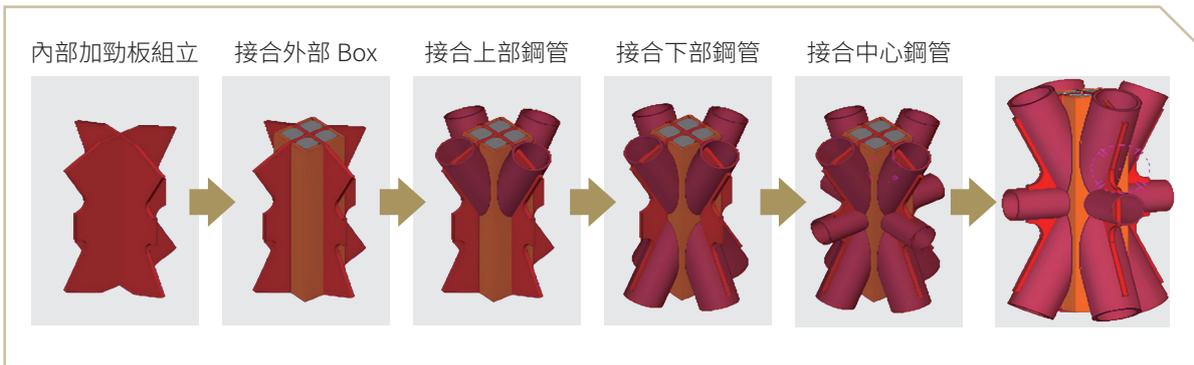


圖 9 NODE 製作順序圖



圖 10 NODE 組裝 (Fit up)



圖 11 NODE 縱向面 (Z 軸) 尺寸檢查



圖 12 NODE 銲道 NDE 檢查



圖 13 NODE 小組立及銲接完成

(四) 巨柱中央部實體模型 MOCKUP 的應用

實體模型 MOCKUP，可讓業主、建築師、設計單位審視其建築物物件將來的完成面貌是否符合設計需求及設計原意。從廠商分割拆解的 3D 與平、立面圖，可了解此巨柱在工地組裝所需要的分塊，這些分塊組合後，須能呈現原建築外觀的一體性，其分割的接縫線條需簡潔，不顯突兀。

此巨柱的實體模型 MOCKUP，還有另一個意義，在經過多個月數次的討論所完成的施工圖，在實體模型 MOCKUP 組立時，可

檢視遭遇之困難及可能需要的調整或修改的細節，及作為工地接頭安裝方式與銲接順序等安裝細節的檢討，以解決後續製造可能發生的難題。像是 ACEUP（連接兩鋼構件的臨時固定連接件）安裝位置、銲道接頭開槽面與預留間隙的恰當性、或圓管接合的段差調整、工廠成品放樣檢查與預組立的檢查重點，最後運到工地，再進行現場防火漆與面漆塗裝，經過業主、建築師與設計單位檢視，確認巨柱未來在旅客大廳所呈現的面貌。



圖 14 巨柱 MOCKUP 預組立—工廠



圖 15 巨柱 MOCKUP-NODE 塗裝／鋅鋁熔射



圖 16 巨柱 MOCK UP 於工地— MOCK UP 區完成組裝



圖 17 工地— MOCKUP 區—接頭使用 ACEUP 組裝



圖 18 巨柱 MOCK UP —銲接前



圖 19 巨柱 MOCKUP —面漆完成

(五) 工廠預組立

在巨柱實體模型 MOCKUP 完成後，開始進行巨柱的製造，由於巨柱必須配合海運分解成小構件，再到工地重新組合成巨柱，為避免組合後產生不當的累積誤差或錯誤，巨柱必須在工廠預組立，再拆解、塗裝，再運到台灣。

由於整支巨柱高度達 19 公尺，考慮到預組安裝施工的安全性，巨柱預組立採用橫躺的方式，預組立先以 BIM 模型資料在放樣鋼板及臨時支撐架上放樣，然後在放樣鋼板上依照標記組立，待巨柱鋼管放置定位後，回饋放樣中心線至巨柱鋼管的中心點上，確認與施工圖與模型尺寸一致。

綜整，巨柱的預組立步驟說明如下（圖 20 — 25）：

1. 以 BIM 模型資訊確認佈置線、工作點 (working point)、端點之尺寸與座標。
2. 於放樣鋼板佈置及標記。
3. 測量基準點及放樣基準線。
4. 構件小組立 (Fit Up) 及銲接。
5. 構件定位與檢核。
6. 調整、檢核接頭間隙、段差。
7. 整體位置檢查 (上、中、下端口尺寸與斜線交會尺寸檢查)。
8. 預組立完成。



圖 20 巨柱預組立－放樣



圖 21 巨柱預組立－Bent 組立



圖 22 巨柱預組立－管件組立

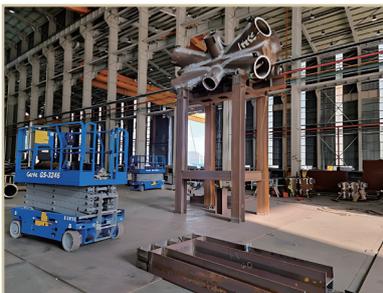


圖 23 巨柱預組立－NODE 定位



圖 24 巨柱預組立－丈量及調整



圖 25 巨柱預組立－完成

貳、巨柱與屋頂桁架吊裝施工

一、巨柱吊裝前置作業

(一) 巨柱的臨時支撐架定位測量

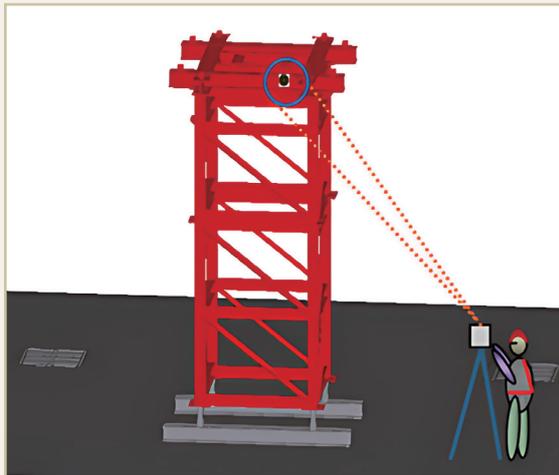


圖 26 巨柱臨時支撐架測量及放樣

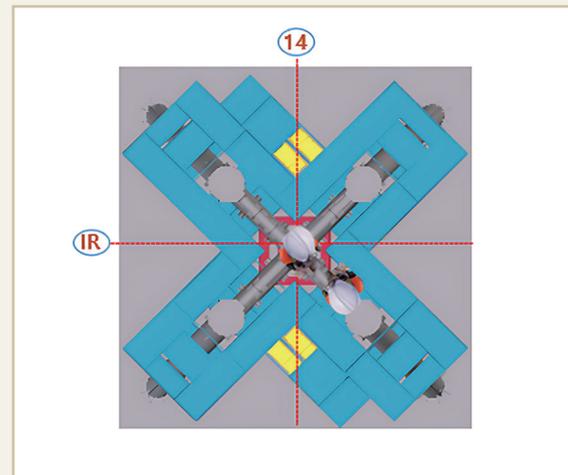


圖 27 巨柱及支撐架中心點定位

(二) 巨柱吊裝定位與測量放樣

1. 在巨柱的測量放樣計畫上，分 3 次檢測，第 1 次檢測下部底座巨柱圓管構件前，標定測量位置，確認下部和上部的垂直度，並安裝貼紙為定位中心。(圖 28)
2. 第 2 次為中央部鋼柱 NODE，NODE 為檢测定位的中心，也是後續屋頂桁架安裝的起始點，確認符合設計位置與高程。
3. 第 3 次檢測巨柱頂部的位位置，藉由量測巨柱上部十字梁外側邊的端口位置座標、高程，與巨柱中心設計值比對符合後，該點位也是後續主桁架測量的起點。

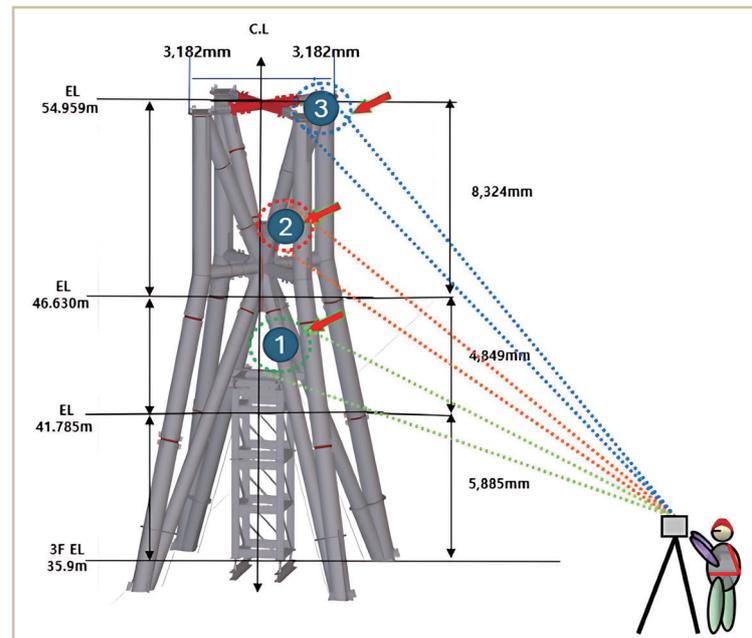


圖 28 巨柱設計位置／高程檢測點

(三) 巨柱吊裝順序

1. 底部巨柱圓管安裝

4 組底部巨柱圓管以對稱安裝為原則，在對向底柱圓管未安裝定位前，吊車必須吊住構件，避免發生重心不平衡之傾斜荷重。

2. 中央部鋼柱安裝

在 4 組底部巨柱圓管安裝後，需立即進行中央部 NODE 之安裝。中央部的 NODE 安裝後，基本上即成穩定狀態，而 NODE 與

下部鋼管柱間先以 ACEUP 固定，後續進行柱底銲接的工作。

3. 上部鋼柱安裝

上部鋼柱的安裝，接頭先以 ACEUP 固定，再架設人員施工架，以做精確的誤差調整。

4. 上部邊鋼柱安裝

上部邊鋼柱安裝，須注意接頭固定以及圓管件間的段差。

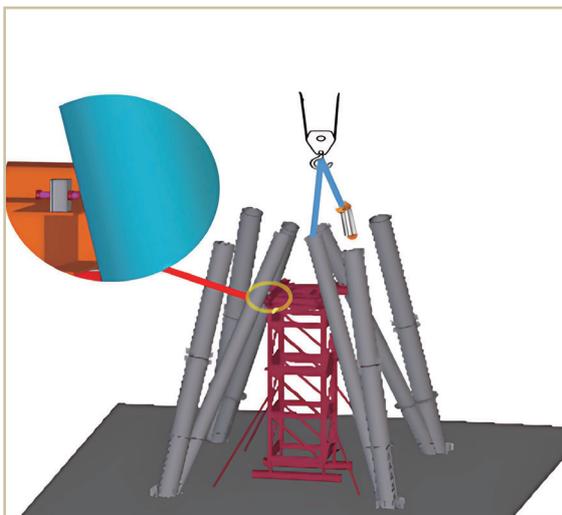


圖 29 巨柱吊裝順序－ 1

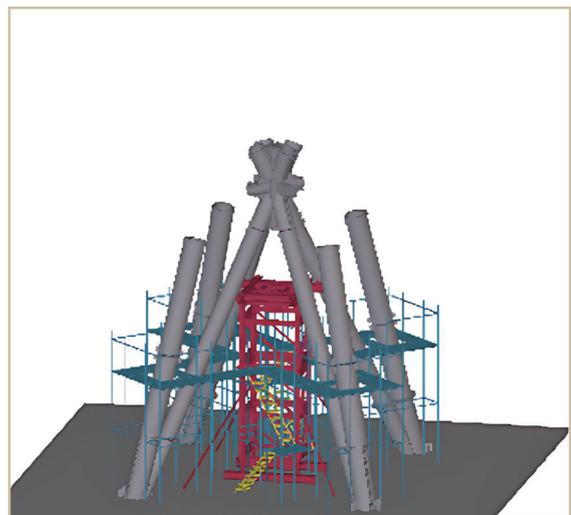


圖 30 巨柱吊裝順序－ 2

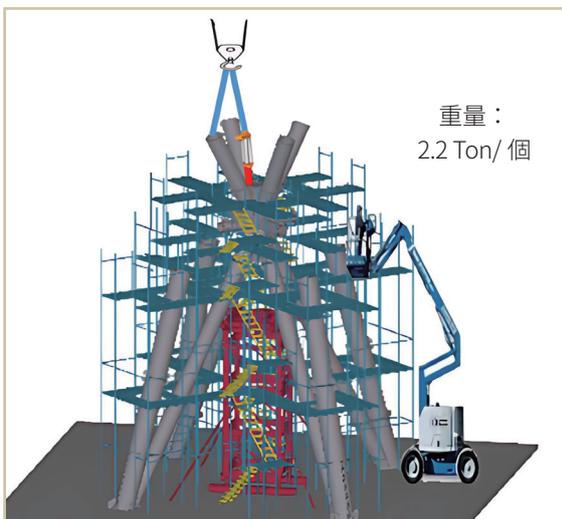


圖 31 巨柱吊裝順序－ 3

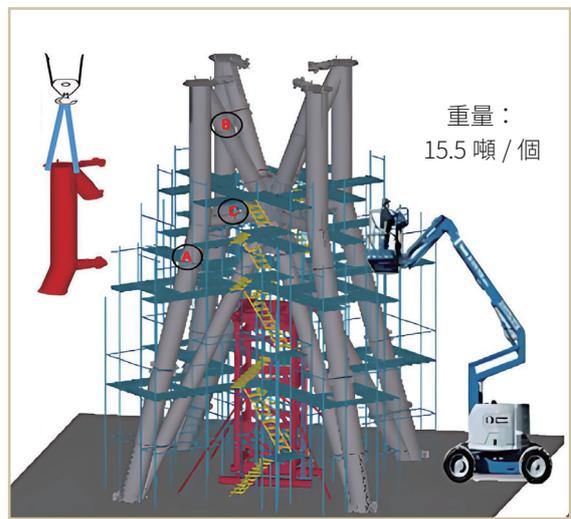


圖 32 巨柱吊裝順序－ 4

5. 水平十字圓管的連接

後續包含頂部中央的水平十字圓管的連接與定位，待調整至定位點，鋼管銜接處的段差需均勻調整至規定的誤差範圍後，至此，巨柱即完成安裝工作，接著可進行巨柱的銲接工作。

(四) 巨柱工地銲接

1. 銲接順序

立柱底座及巨柱接頭銲接。除了底座銲接在巨柱下部鋼管與中央部 NODE 定位完成後，即進行銲接。後續巨柱的 7 個階段的銲接，必須在測量檢測巨柱中心值符合設計規定，銲接接頭調整至符合規範要求方得進行。

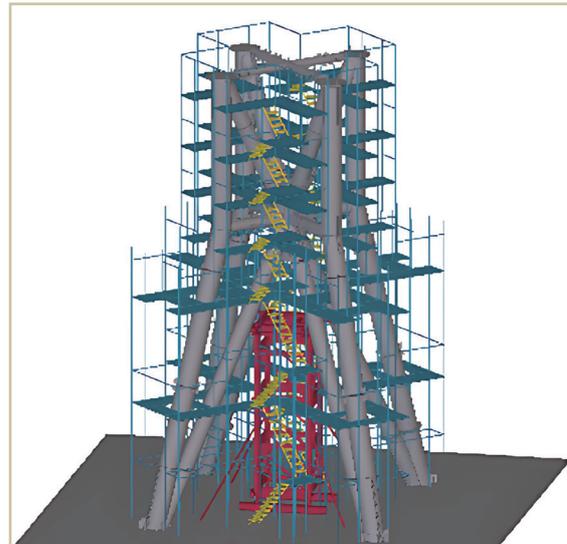


圖 33 巨柱吊裝順序－5

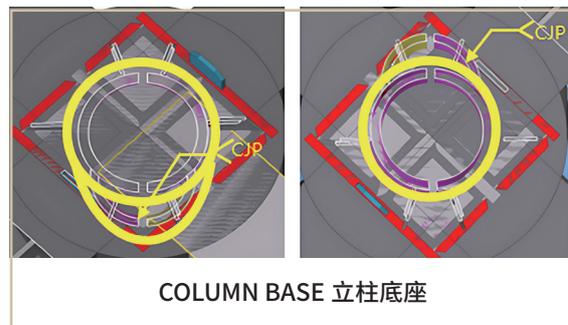


圖 34 巨柱底座銲接圖

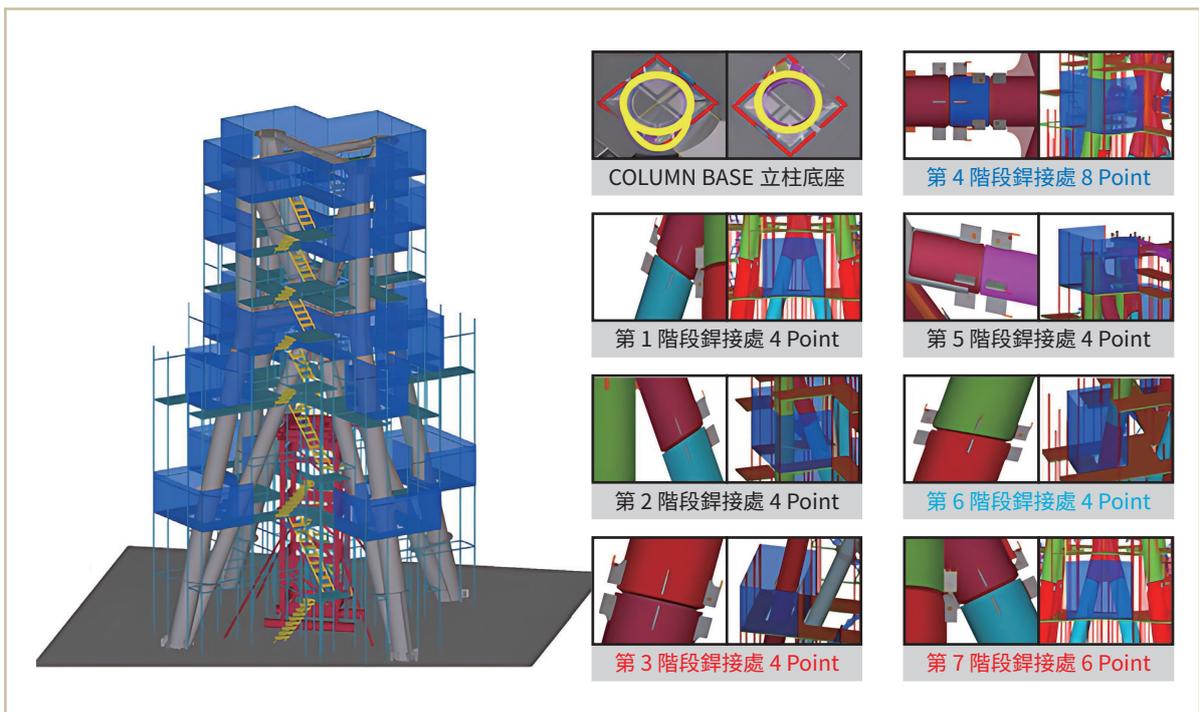


圖 35 巨柱銲接－7 個階段銲接及銲接點

2. 銲接要求

- (1) 對稱銲接：避免銲接收縮影響巨柱四邊柱不等高，所以兩個銲工要在對稱方向一起銲接。
- (2) 銲接前處理：研磨銲接面、確認背襯板有密貼，並進行預熱。
- (3) 銲工為 6G 銲工資格並列冊管理。
- (4) 非破壞檢測：圓管厚度 50 釐米及 65 釐米，分 2 次檢測。銲道完成 30% 進行第 1 次超音波 (UT) 檢測，待 100% 完成後進行第 2 次超音波 (UT) 檢測。

- (5) 銲道外觀檢查：銲冠以 2-3 釐米作為管理值，勻稱的銲道為外觀檢查的重點。

3. 自走式自動電銲機

16 支巨柱，工地銲接部共 608 (16*38) 銲點，在其中 192 處銲道接頭，以自走式自動電銲機完成銲接，確保銲道完成面的外觀品質，並提高銲接效率，減少人工作業的時間。實際適用的說明如下：

- (1) 檢討適用部位，直徑 660mm/815mm，厚度 50mm/65mm 鋼管銲接部分，每支巨柱有 12 處 (圖 36)。

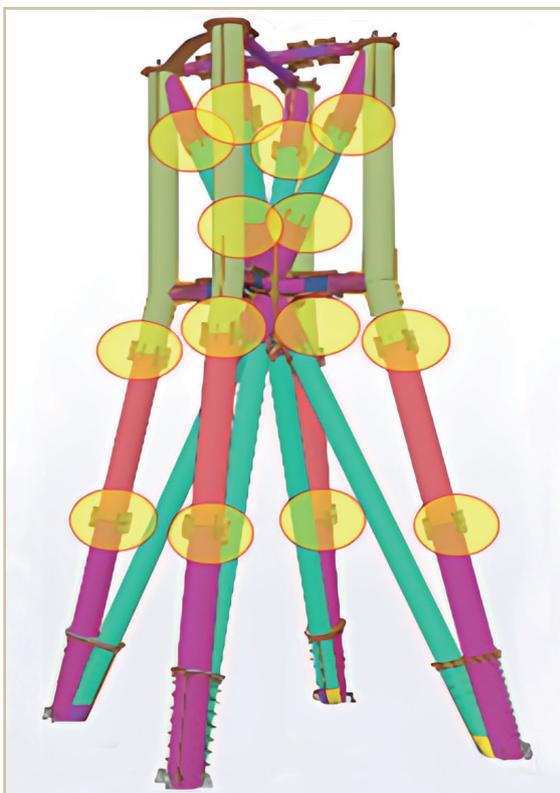


圖 36 自動電銲的可銲接接頭點



圖 37 自動電銲與軌道干涉點的位置

(2) 不適用自走式自動電銲機的位置

a. 中央部的 Node，其銲接位置與電銲機軌道干涉（最小構件間距需 500mm，圖 37）。

b. 水平鋼管、圓管底座。

(3) 在不適用自動電銲處的銲道，以加強訓練 6G 銲工的技藝，使其達到同樣的銲道品質，並以平行作業完成不適用處的銲道，維持巨柱銲接完成時間的管控。

(4) 執行的控管：先辦理銲接程序認定試驗（PQR），以放射線透射試驗及機械試驗確認試驗結果，確認相關參數後完成銲接規範 AWS D1.1 的銲接程序（WPS/PQR），在完成 30% 手動打底銲接及非破壞檢測後，裝設自走式自動電銲機，需以合格的 6G 銲工操作銲接設備，進行自動電銲，最後完成巨柱銲道（圖 38）。

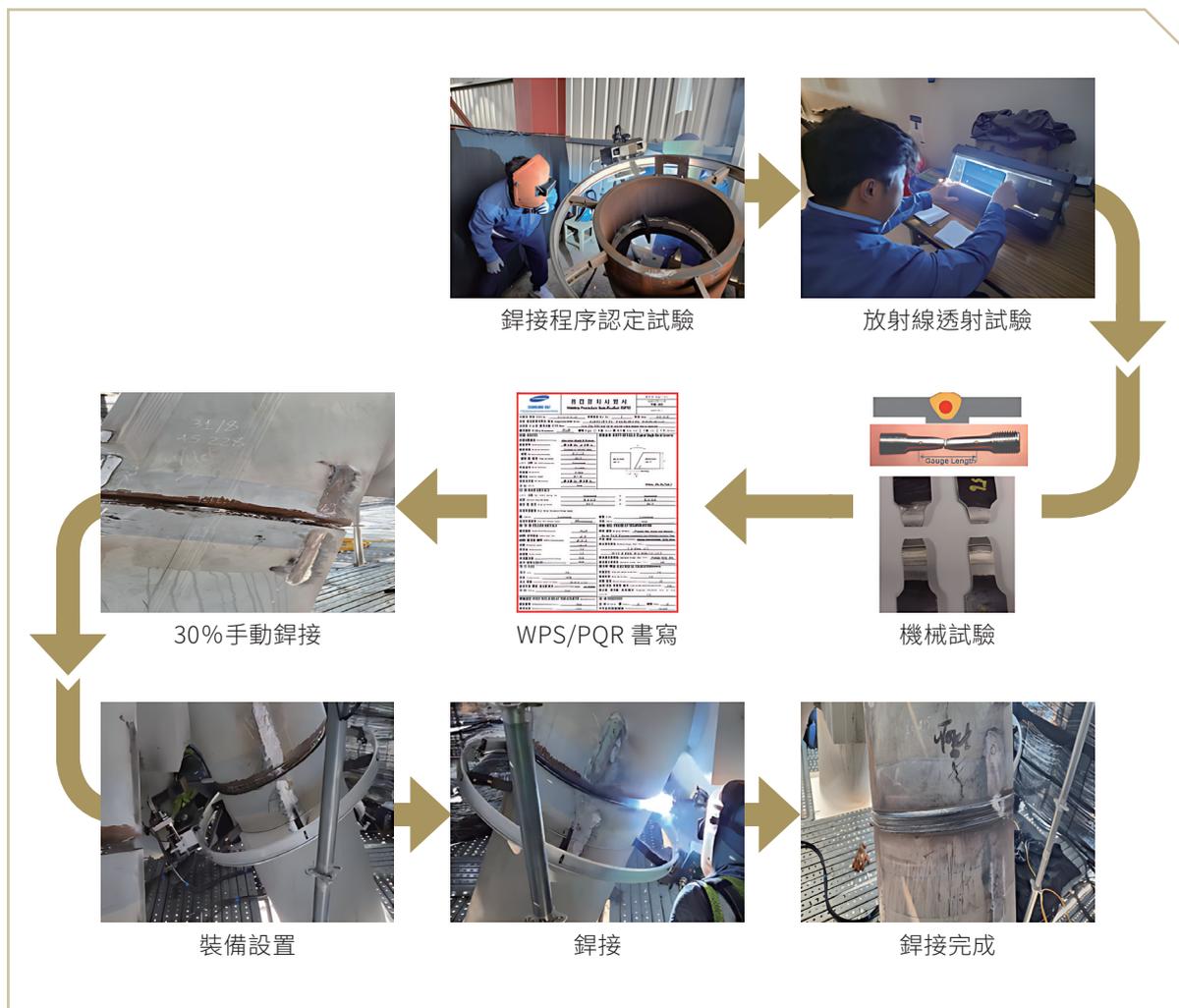


圖 38 自走式自動電銲機執行程序

(5) 效能評估說明：銲接投入人力生產率分析，與自動銲接相比，顯示連續銲接生產

率提高 1.9 倍，且可有效降低手動銲接的不良率（3% → 0.5%）（圖 39、40）。

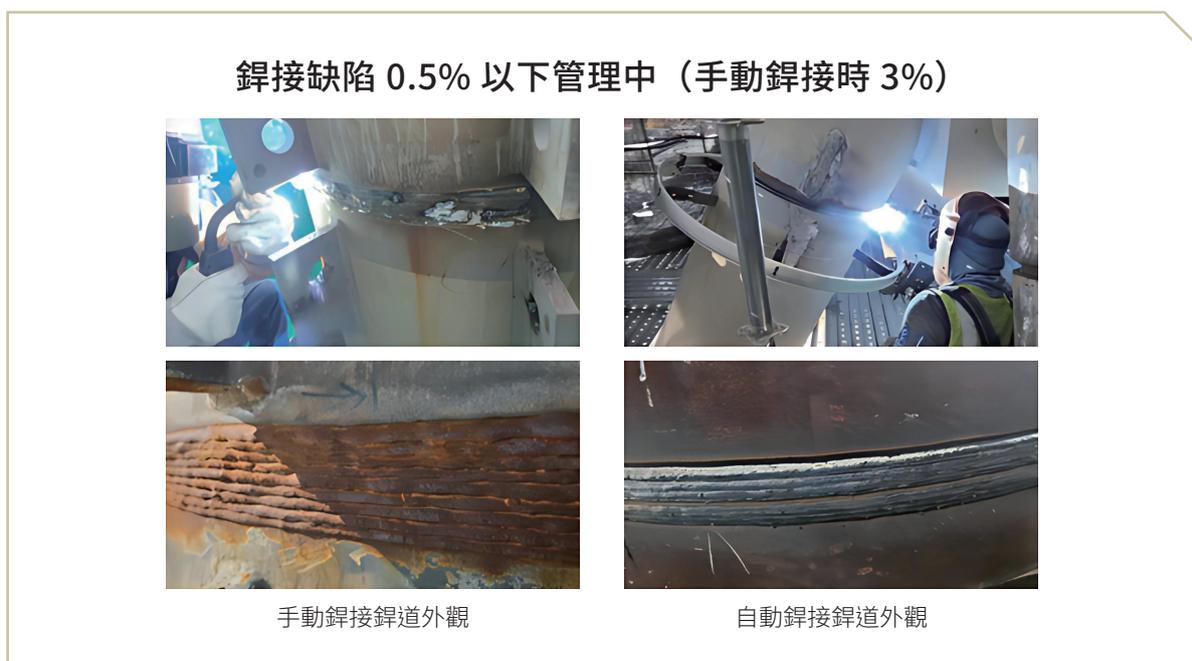


圖 39 自動電銲之不良率比較

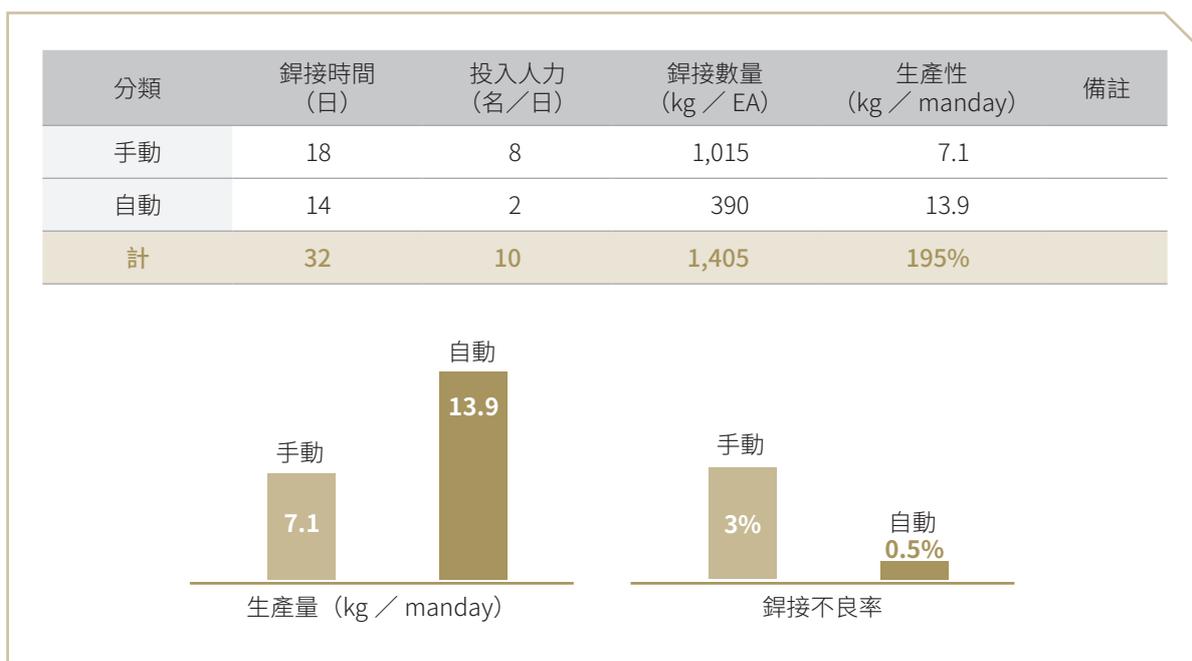


圖 40 自動電銲之效能統計分析

(五) 巨柱安裝的連接器 (Tatekata) ACEUP

對於本案，巨柱臨時接合所使用的鋼構可調式連接器 (Tatekata) ACEUP (以下簡稱：ACEUP)，主要應用在安裝位置偏差的細微調整，以及高程上的調整。另外，也針對使用期間的結構應力也做了結構安全的檢討分析。

廠商針對使用 ACEUP 來進行巨柱組立及固定，進行結構安全性的檢討分析，特別在地震力的評估，而提出三種模式進行結構分析。經過檢討分析，ACEUP 可以承擔巨柱接頭百分之三十銲道量的結構應力，而且巨柱接頭百分之三十的銲道量可以通過結構安全性的評估。因此，拆除 ACEUP 的時機，於巨柱接頭完成百分之三十的銲道量，再由自動電銲設備完成後續的百分之七十。



圖 41 ACEUP 使用於 NODE 與圓管

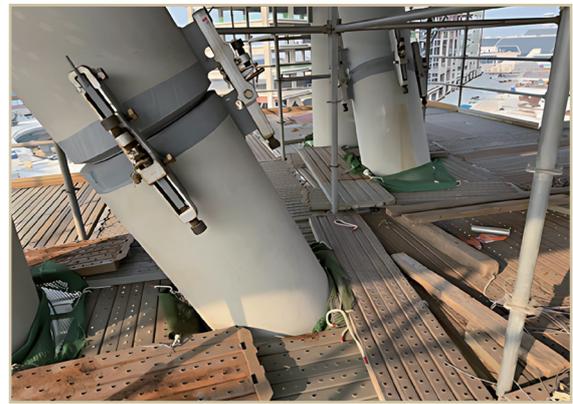


圖 42 ACEUP 使用於圓管與圓管



圖 43 頂部水平十字管接頭



圖 44 接合處間隙及段差

二、軌道平台系統 (RPS) 與桁架支撐架系統 (Bent)

主航廈三樓版高程 36 公尺，一樓版高程 28.9 公尺，屋頂則為波浪狀，高程從 51 公尺變化到 55 公尺；三樓版結構為鋼筋混凝土結構，而三樓以上為 414 公尺（東西向）長 / 242 公尺寬（南北向）的屋頂鋼結構物。

此外，第三航廈南北側為斜面式結構，無法作為進出動線，僅東側有道路銜接，西側一樓為機坪可用來將材料吊放至三樓，因此必須以大型吊車來吊裝鋼構材料與施工機具。

如上所述，吊車是完成巨柱與屋頂鋼結構所必要的工具，但是對於主航廈的三樓版結構強度對必須使用的吊車而言，樓版結構所提供的支撐並不足夠，加上面對寬闊的屋頂波浪狀的桁架屋頂，必須要地組桁

架、安裝臨時支撐架與人員施工架才能作業，若未規劃好吊車與臨時支撐架的使用空間及順序，將會造成施工混亂、品質不穩與工期延宕的可能，更重要的是確保施工過程的安全性，更是一大挑戰。

廠商將整個屋頂鋼構依照巨柱、邊柱、主桁架的特性分成 21 區（如圖 45）。其中 TC1-TC7 位於巨柱與巨柱的主桁架間，為屋頂結構的主軸，而南北兩側邊柱與巨柱間的次桁架區，則配合在 TC1-TC7 逐步完成時，才能接續完成。因為對稱、拱度與應力平衡之因素，南北的次桁架區的 TN/TS 區需對稱完成後，一起解除臨時支撐，方能以對稱平衡的型態完成其結構的面貌。

因此，廠商利用主航廈由西向東的巨柱區軸線 (IR/QR LINE) 兩側，以軌道平台系統 (Rail Platform System, RPS) 進行巨柱及屋頂鋼結構的吊裝，不僅減輕在樓板上臨時荷載，也減少吊車設置的數量及節省施

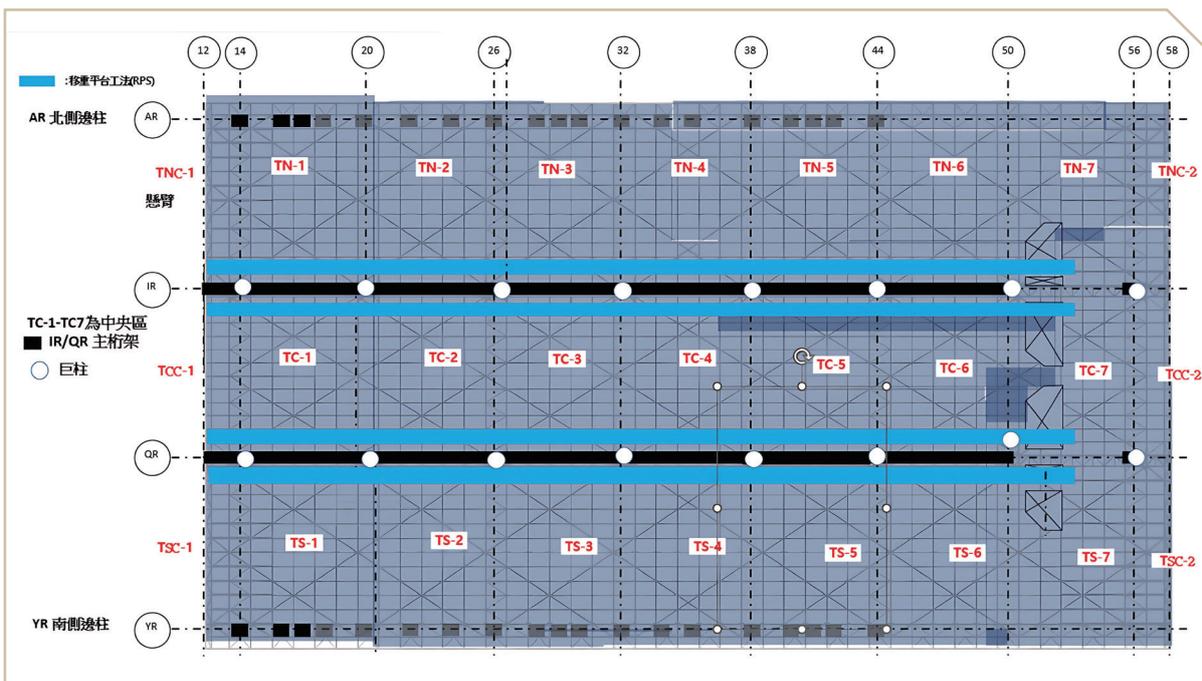


圖 45 屋頂鋼構分區圖

工時可使用的空間，並可縮短工期，提高鋼構安裝品質及降低成本。

RPS 上方有運料平台及吊車平台，進行運送吊裝巨柱、主桁架與次桁架。另外，依

據屋頂桁架鋼構的荷重、RPS 位置及吊車能量與範圍，其吊裝需搭配臨時支撐架 (Bent) 的布置，方能完成屋頂桁架鋼構的安裝。

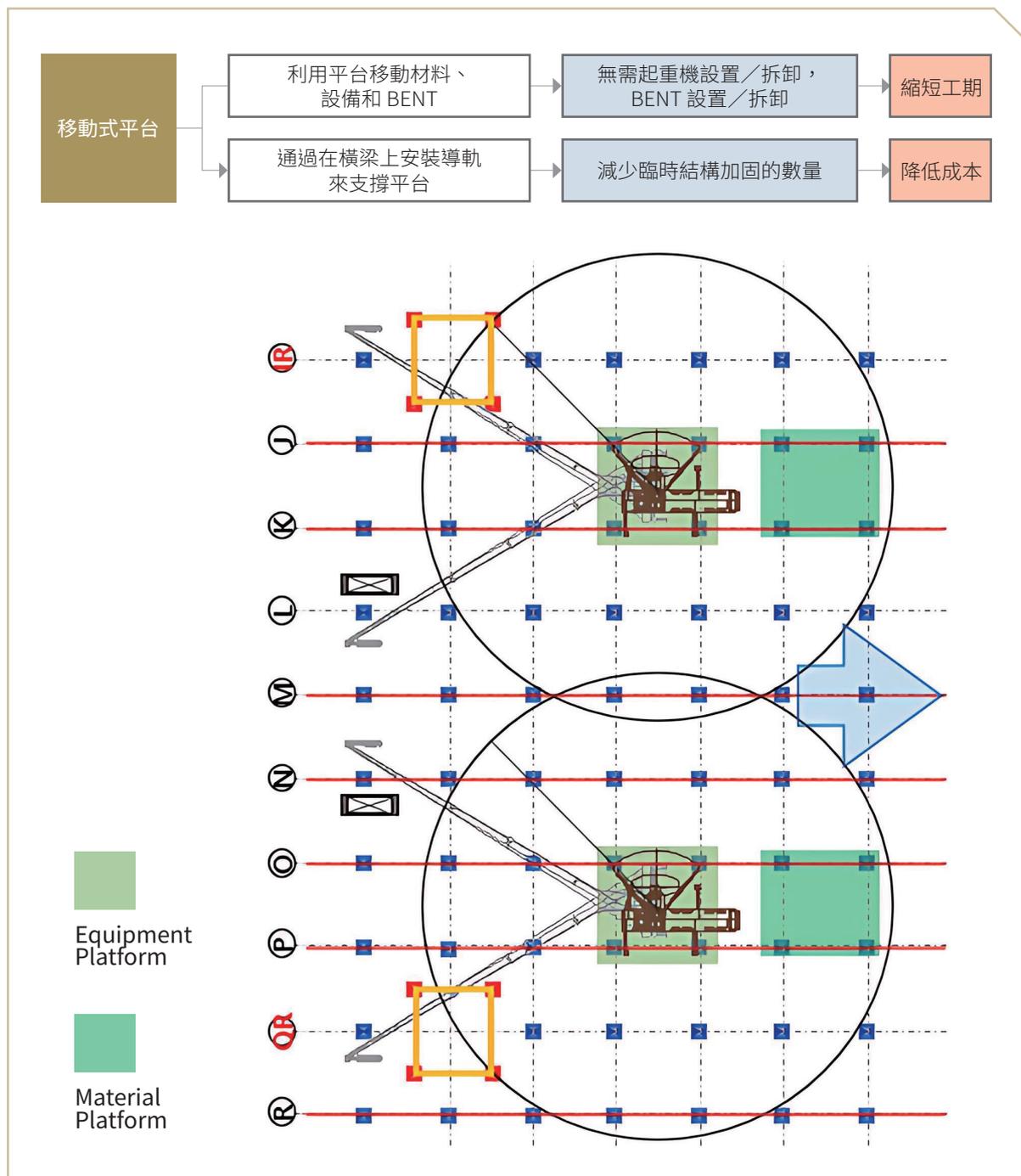


圖 46 RPS 與支撐架布置

(一) 作用於三樓梁版之結構考慮

如圖 47，Zone 1 到 Zone 3/TC1-TC7，除利用 RPS 軌道平台運輸吊車與巨柱，而主桁架與次桁架也利用 RPS 完成。但是，在 Zone 3，RPS 軌道平台必須經過大型開口，支撐架須有特別的補強措施，甚至要從一樓往上安裝支撐架。而 Zone 4 區，其三樓版有較大的承載荷重，因此在樓板上使用 160 噸吊車，搭配支撐架，即可進行屋頂桁架鋼構的吊裝。

主航廈三樓共設置 4 條 RPS（綠色），經過 ZONE 3 時有大型樓板開口，因此需自一樓向上安裝臨時支撐架以支撐 RPS（藍色），黃色及紅色區域樓板經檢討可以通行 160 噸吊車。

圖 48，為 RPS 軌道剖面構造及相關構造的尺寸。RPS 軌道安裝在 1 公尺高的 PC 混凝土塊上（避開樓板上的預留柱頭），此混凝土塊負責將平台上的吊車荷重傳遞到樓板的結構樑上。

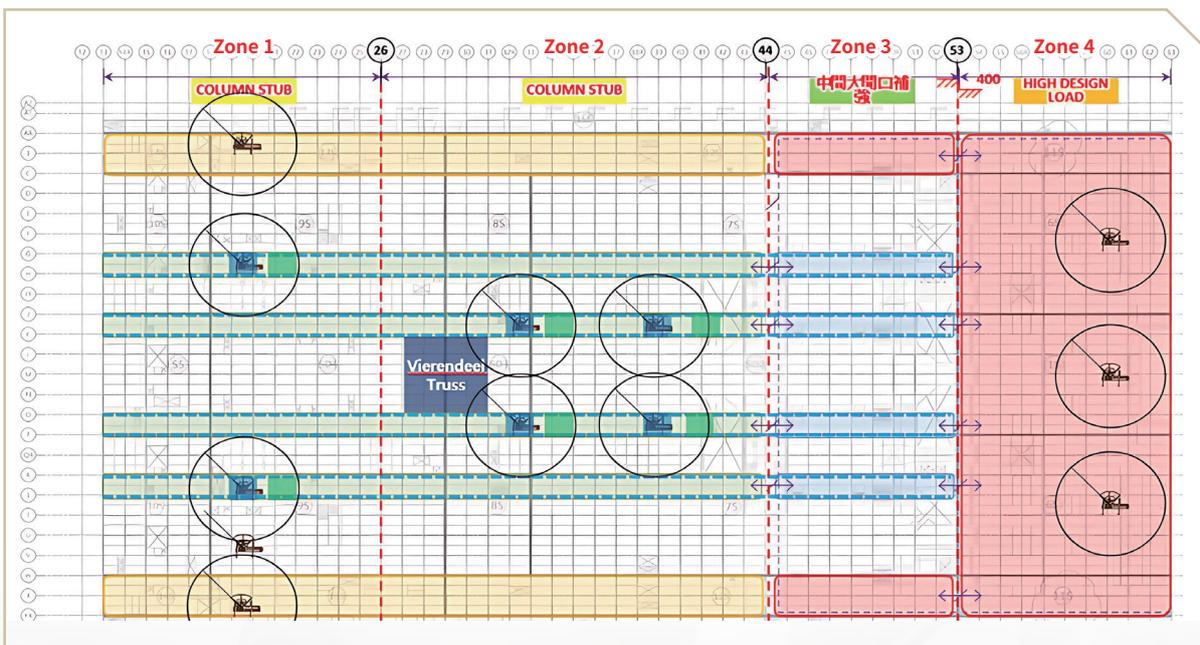


圖 47 主航廈三樓 RPS 與吊車配置

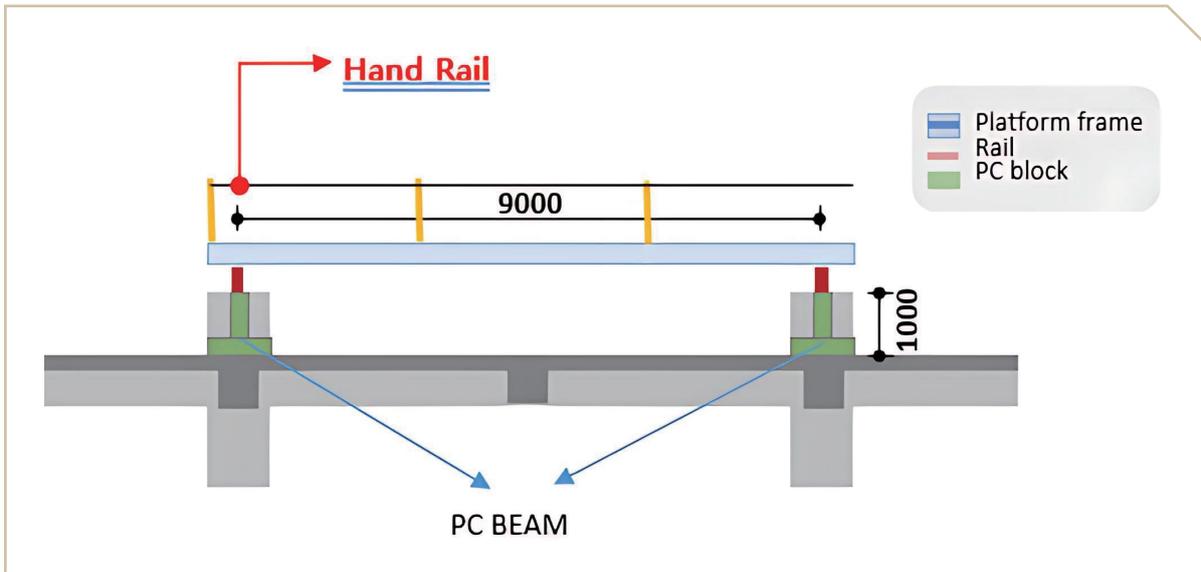


圖 48 RPS 一軌道－PC 混凝土塊構造



圖 49 RPS 軌道使用軌道夾安裝中



圖 50 RPS 軌道夾確實固定



圖 51 吊運吊車至平台



圖 52 RPS 吊車踩立於平台正確位置

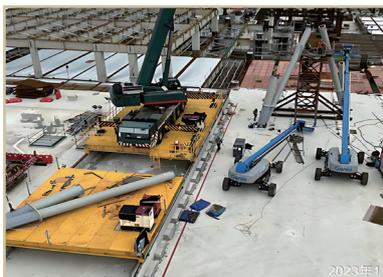


圖 53 RPS 吊車與運料平台



圖 54 RPS 吊車平台與軌道

(二) 配合 RPS 之屋頂鋼構吊裝的順序

在一樓 G 機坪將軌道、PC 混凝土塊、吊裝及材料、運送平台安裝至三樓版上，再將吊車及鋼構件運送定位，完成 RPS 及吊裝前作業（圖 49－54）。屋頂鋼構吊裝分區

的作業順序說明如下：

1. 完成 TC1 巨柱、主桁架及次桁架。
2. 接著進行南、北邊的 TS1、TN1，形成完整的南北向屋頂圓弧面。

3. 後續完成 TC2，再完成南、北邊的 TS2、TN2，依此順序往東完成到 TC7。

4. 整個屋頂桁架鋼構以 RPS 為中心，先施工 TC 區再完成 TN/TS 區。

三、屋頂鋼構吊裝

主航廈之桁架結構分區如圖 45，16 支巨柱，由兩條東西向的主桁架支撐，南北兩邊為邊鋼柱，主桁架與邊柱間則為次桁架。

(一) 主桁架的吊裝

主桁架在巨柱上方的鋼構桁架稱為 Head Truss（桁架頭），Head Truss 為屋頂、主桁架與巨柱樞紐，Head Truss 安裝時，巨柱需完成 30% 的銲接工作；在 Head Truss 銲接完成時，巨柱也必須完成 100% 的銲接，後續主桁架才能吊裝連接。

此主桁架安裝順序說明如下，如圖 55：

1. 在巨柱接頭銲道完成 30%，巨柱頂的 Head Truss 可進行安裝、銲接。

2. 同時地組工作包含 4 組支撐架的安裝，以及鋼構桁架本身的地面組立。

3. 主桁架的地面組立，分成 5 組，第 1-4 組會形成方形立面模組，每組先片面組，再組合成方形立面模組桁架，第 5 組為閉合區，則是在空中以單一構件逐一安裝。

4. 地組時，確認組合尺寸的正確性，完成螺栓鎖固與接頭銲接。

5. 主桁架分 5 組地組，利用 RPS 上的吊車吊裝，由兩端巨柱側先吊，最後在中間閉合。

6. 空中閉合接頭經檢測位置與高程符合設計值後，即進行螺栓鎖斷與銲接工作。

7. 每組間之閉合接頭，其上下端接頭均為全滲透銲道，其背襯為 T 型連接板，並具備臨時構件連結支撐功能。

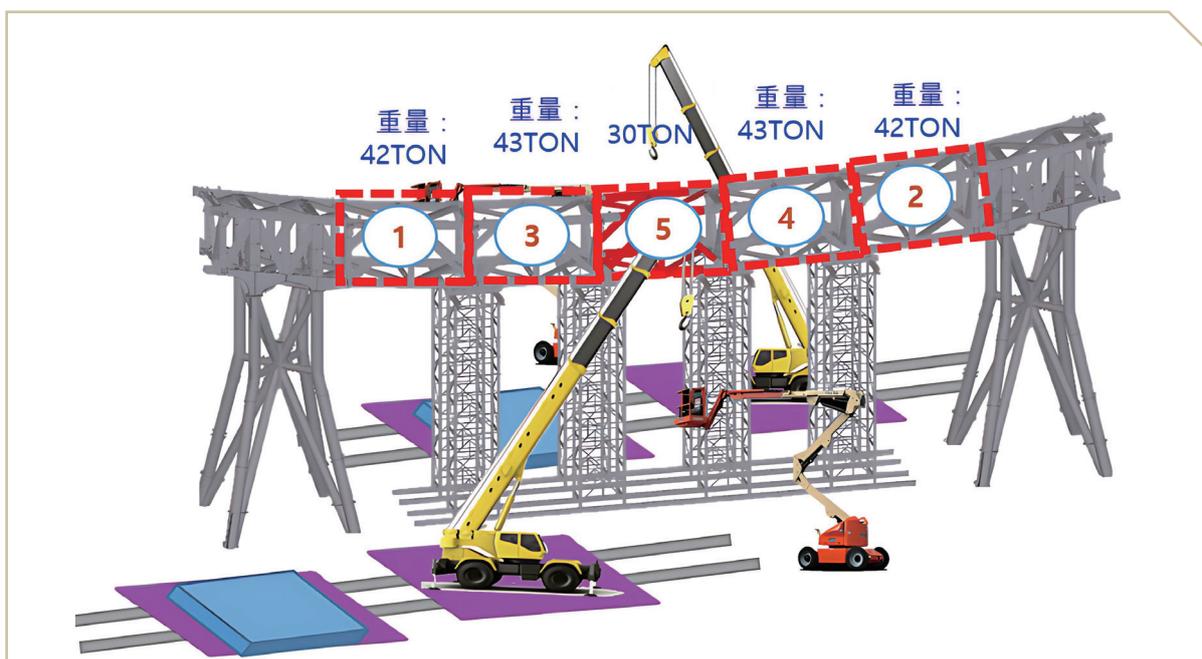


圖 55 主桁架施工順序圖

(二) 巨柱間次桁架的吊裝

在主桁架完成安裝後，即可進行次桁架的安裝。次桁架的吊裝順序如下：

1. 主桁架間的次桁架長度為 72 公尺，設置兩組支撐架，支撐次桁架的吊裝。
2. 每組次桁架分三段於地上組立完成。

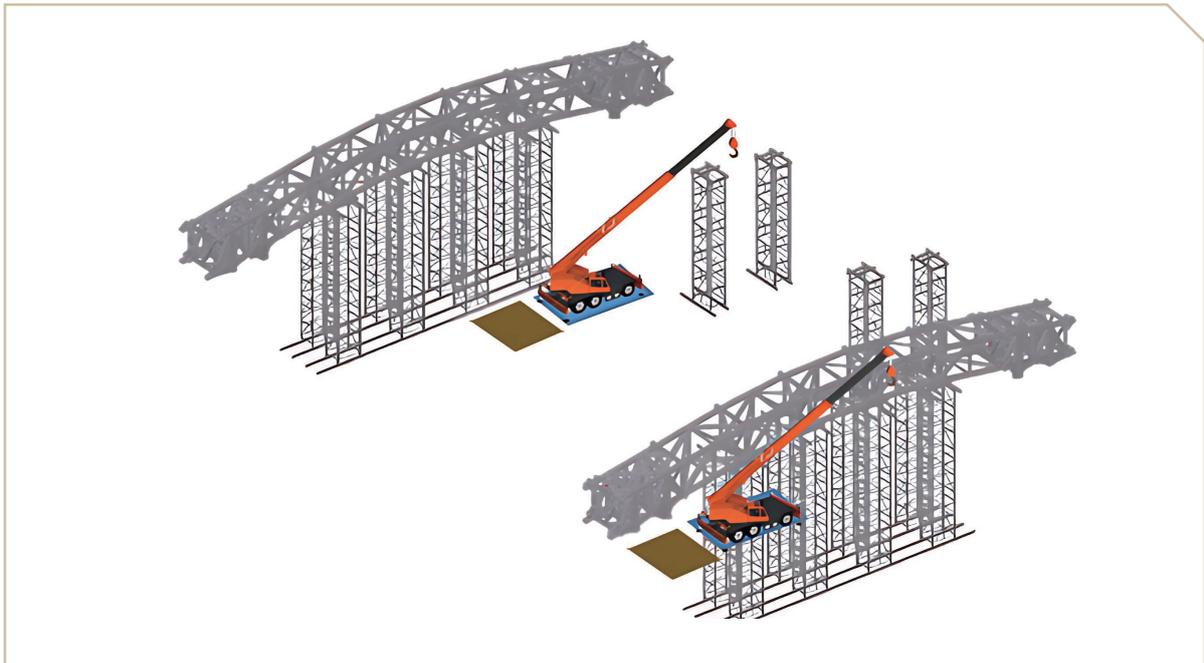


圖 56 次桁架施工順序圖(1)－安裝固定用的支撐架 (Bent)

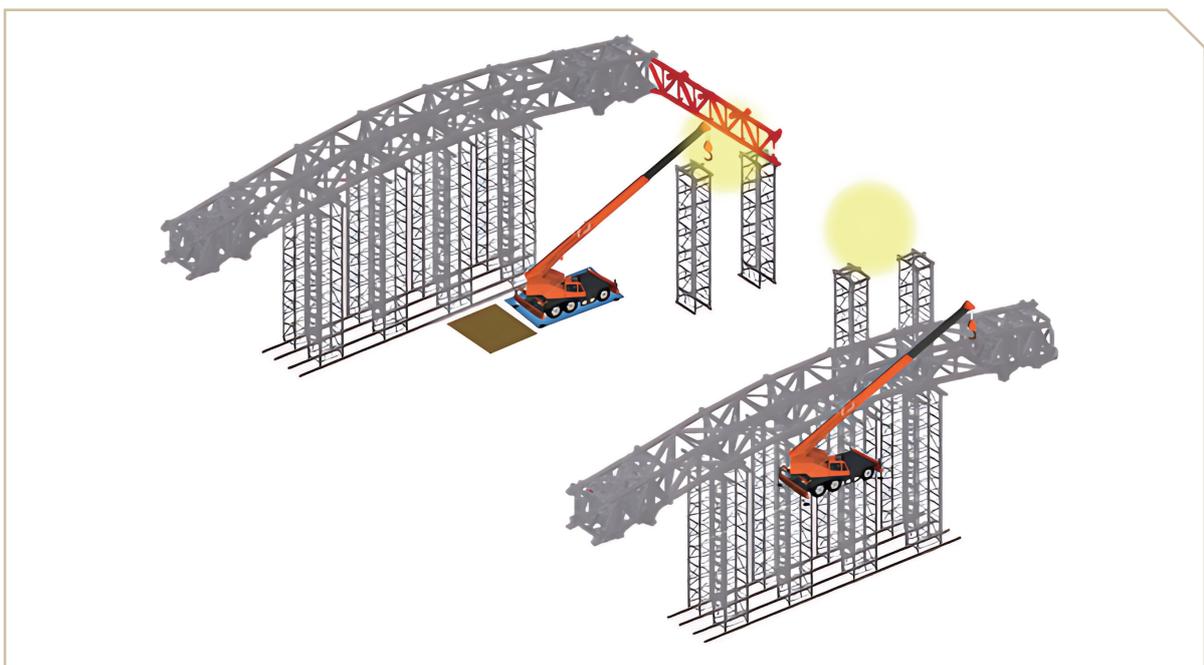


圖 57 次桁架施工順序圖(2)－安裝第 1 組桁架

3. 次桁架安裝第一、三段，最後安裝中央閉合段。

4. 第一、三段次桁架，為避免側向不穩

定，在臨主桁架兩側架設臨時水平桿，維持穩定性，待下一組次桁架完成，在兩組次桁架間完成水平斜撐桁架，即可拆除兩側臨時水平桿。

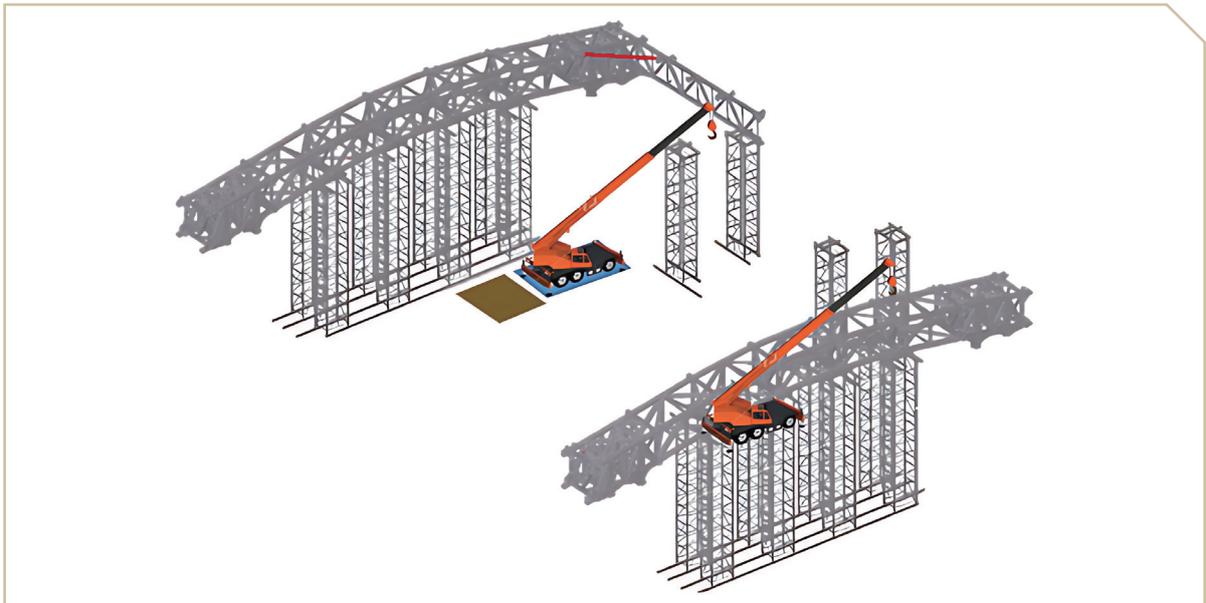


圖 58 次桁架施工順序圖(3)－安裝臨時水平桿 (Bracing)

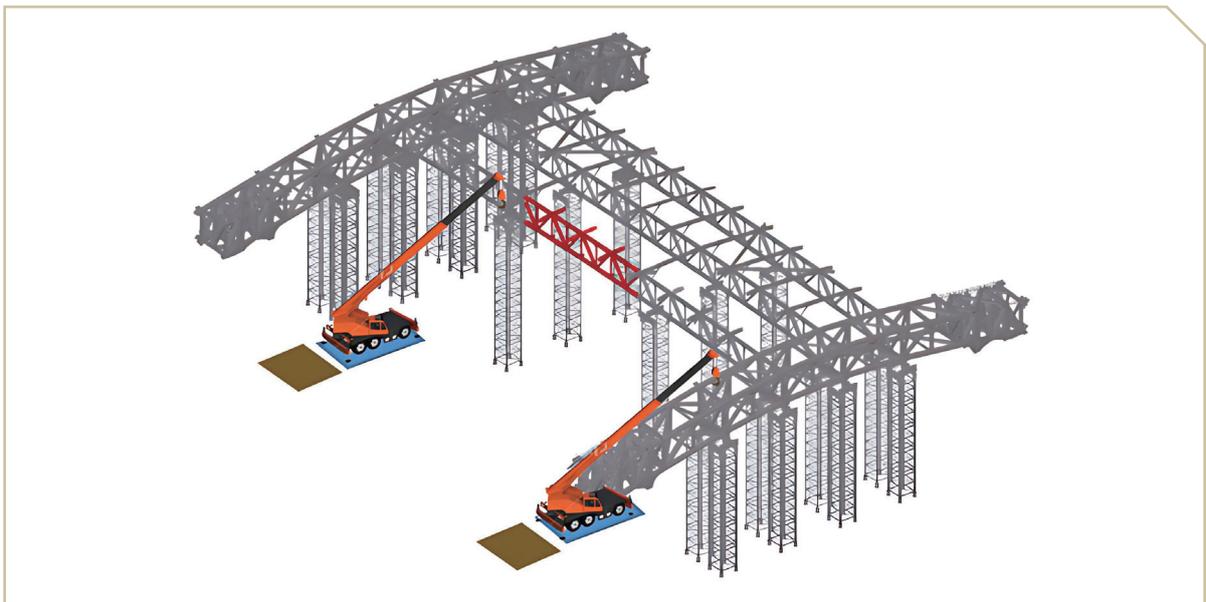


圖 59 次桁架施工順序圖(4)－第 3 段桁架閉合及水平斜撐桁架 (Bridge Truss)

(三) 邊柱及邊跨的次桁架吊裝

屋頂邊柱為圓鋼管構造，此邊柱兼具建築美

觀與結構支撐，因圓鋼管上下端均為鉸支承 (PIN)，安裝程序與精度管理並不容易。

以下為邊柱及邊跨次桁架的安裝順序說明（圖 60－63）：

1. 安裝邊柱底座，接著四樓邊牆混凝土澆置完成，安裝邊柱上部鋼柱。

2. 支撐架安裝、定位，次桁架安裝（兩側先裝），再利用 160 噸吊車安裝閉合段。

3. 地組及安裝第 2 段次桁架並完成螺栓鎖固與銲接工作。

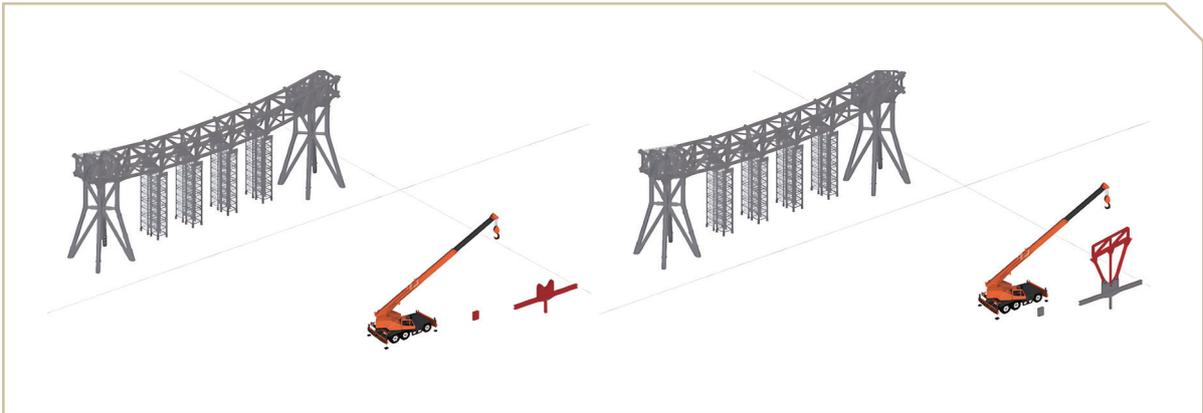


圖 60 邊柱底座及上部鋼柱安裝順序

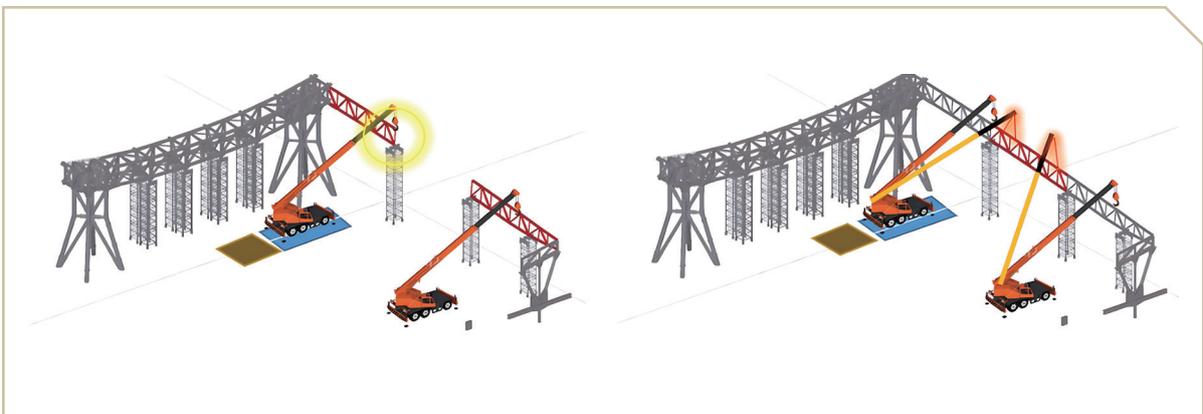


圖 61 邊柱支撐架、次桁架安裝

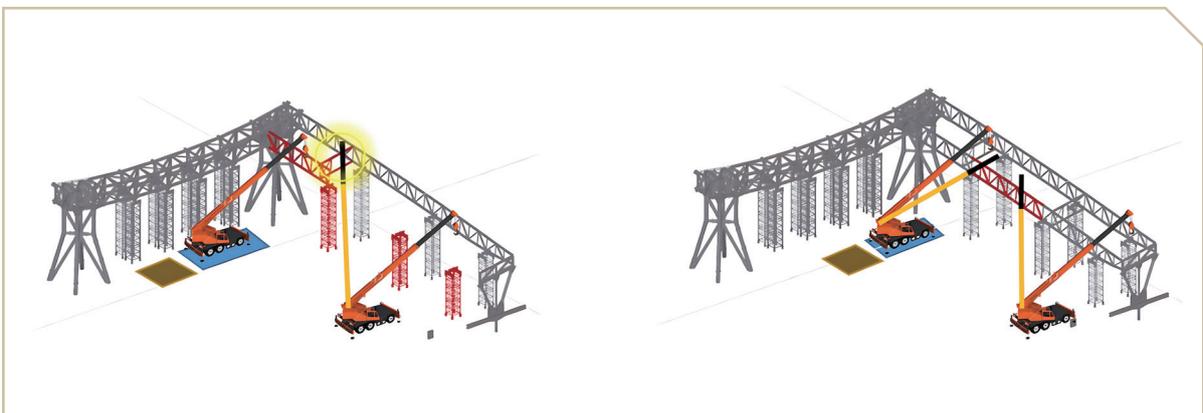


圖 62 第 2 段次桁架安裝及銲接

4. 第 1、2 段，第 2、3 段次桁架間桿件對接安裝。

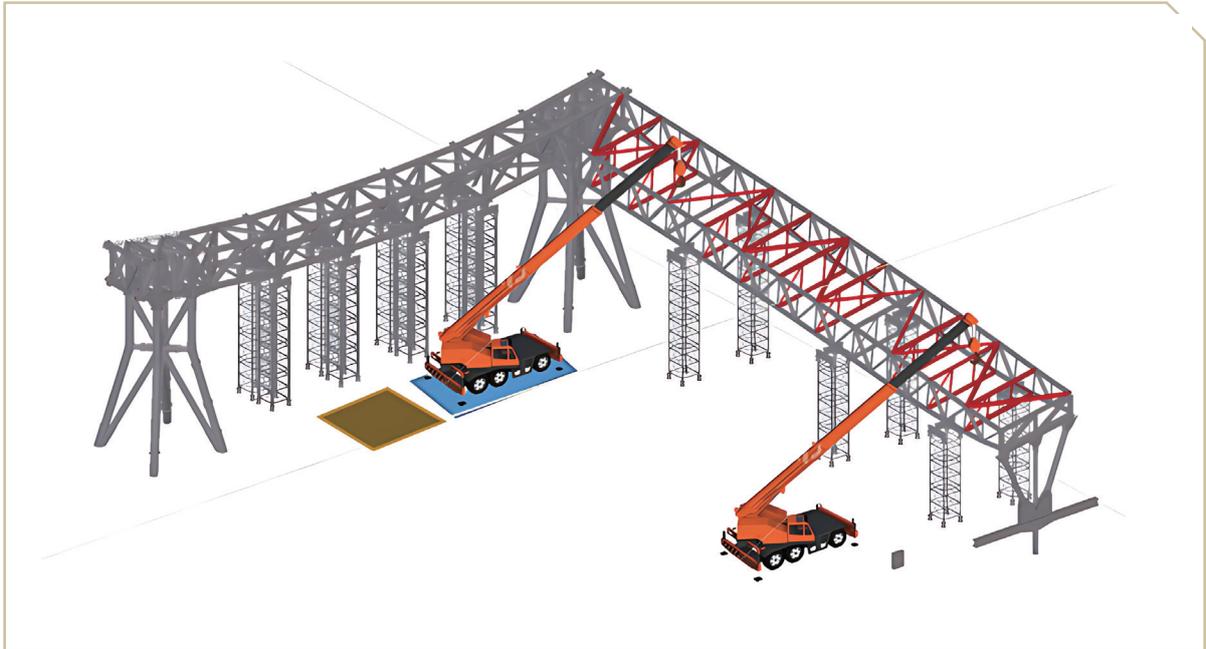


圖 63 第 1、2 段次桁架連接及銲接

參、結論

主航廈的屋頂鋼結構由東西向的主桁架及 47 條南北向的次桁架組成，面積達 10 公頃之雙弧型屋頂由 16 支巨柱支撐。其中，巨柱是整個屋頂結構的起點，因此其製造精度與施工規劃對工程成敗至關重要。為確保品質，以台灣世曦為主之設計監造團隊、三星物產 / 榮工公司與鋼構專業廠商東星公司投入大量資源及時間，包括鋼板材料、圓管精度控制、中央部 NODE 組裝、巨柱實體模型與預組立等，現場使用自動銲接機確保品質並提高效率，為後續大跨度屋頂提供堅實基礎，此經驗與流程亦延伸於後續主桁架及次桁架之製造，形成一致之品質與施工模式。

屋頂現場施工階段，則採用地組模組化施工方式，結合 RPS 軌道平台與支撐架配置，依序完成主航廈的巨柱安裝與屋頂桁架鋼構架設，最終成功完成整體屋頂結構。

順著這個施工邏輯，接著的帷幕系統、屋頂、水電設備及雲頂系統，也都依此順序完成，形成一個井然有序的施工環境，對於主航廈的完成，有了一個清晰的藍圖，也符合契約里程碑的要求。

參考文獻

1. 《建築鋼構施工手冊》，中華民國鋼構協會。

2. 《結構鋼構施工品質管理指引》，內政部建研所出版。
3. 《鋼構吊裝作業施工計畫書編制指南》，公共工程委員會（PCC）。
4. 《鋼構吊裝安全手冊》，勞動部職安署出版。
5. 《ISO/IEC 17020：2012 符合性評鑑－各類型檢驗機構施行檢驗之作業要求》。
6. 《CNS 12209 控制扭距之高強度螺栓、六角螺帽及平墊圈組》。
7. 《CNS 12618 鋼結構鐸道超音波檢測法》。
8. 《CNS 13021 鋼結構鐸道目視檢測法》。
9. 《AWS D1.1-2020 年版（WPS/PQR）與焊工資格認證、外觀目視檢查及非破壞檢測（NDE）》。
10. 《AWS A5.17 潛弧鐸接規範》。
11. 《AWS A5.18 氣體遮護電弧鐸接規範》。
12. 《AWS A5.20 包藥電弧鐸接規範》。
13. 《AISC Manual of Steel Construction》。
14. 《RCSC for A325 and A490 bolts》。
15. 《Temporary Stability during Erection》（AISC Design Guide 10）→介紹鋼柱與桁架安裝時的臨時穩定設計原理。
16. 《Crane Handbook》（Construction Industry Research and Information Association, CIRIA）→涵蓋起重設備配置、吊裝路徑、安全係數與吊索選用原則。
17. 日商特科能股份有限公司「ACEUP」產品型錄。
18. ACEUP 工法之主副桁架組裝分析。

捷運車輛 智慧化維運系統之研究



近年臺灣大眾運輸系統快速成長，捷運系統需同時兼顧行車調度效率與安全可靠。然而，傳統車隊管理常面臨「行車與維護資料不足」的問題，例如列車設備狀態資訊散落、故障記錄不完整、難以即時掌握車況而影響調度決策與維修優先順序。本研究針對現有捷運系統與車輛，建置了「遠端資訊擷取與整合系統」，以即時擷取、整合每台捷運車輛的運行資訊。並經由 5G 網路傳送至捷運雲端平台進行保存。另外本研究也開發「遠端車輛監控儀表板系統」，以提供行控中心於行車調度時參考。而維修人員也可以利用此儀表板系統查看故障排除程序、調閱紀錄歷史數據、或下載設備紀錄等。導入車輛遠端資訊擷取與整合系統後，預期可提升車輛可用率 (Vehicles Availability)、降低平均修復時間 (MTTR) 並強化調度決策品質，且為未來導入 AI 預測性維護與數位雙生系統建立基礎。

關鍵詞 Keywords

軌道車輛 Rail Vehicles

控制與監視系統 Control And Monitoring Systems

智慧維護 Intelligent Maintenance

國立高雄科技大學 鐵道技術中心

主任

張簡嘉王

研究員

郭家銘

工程師

鄭亦展

研究員

陳品均



壹、前言

在臺灣及全球多數都市，捷運系統為城市軸心型大眾運輸，承擔大量日常通勤與旅客服務。為維持高可用性與準點率，營運單位需掌握列車的運行狀態與設備健康情形，才能在第一時間做出調度與維修決策。然而現實情況往往是：

一、資料分散且不即時

車輛的感測資料與故障記錄可能分散在多個子系統（牽引、煞車、門控、空調、電力、PIS等），缺少整合平台；

二、缺乏結構化歷史紀錄

維修紀錄常以人工工單或非結構化文本保存，導致統計分析、故障趨勢辨識困難；

三、調度決策資訊不足

運務調度常藉由司機回報或車務中心電話指令處理突發事件，缺乏可量化的車況數據支撐快速判斷；

四、維護採取被動反應式

現場故障發生後才維修 (Corrective Maintenance)，而非主動排程 (Preventive / Predictive Maintenance)，造成延誤與成本上升。

這些問題限制了捷運系統的運營效率、資產利用與乘客服務品質。為解決此一挑戰，遠端資訊擷取與整合系統被提出作為捷運車輛關鍵基礎設施：透過即時資料收集、整合監視、事件管理、以及資料分析與預警，將車輛各子系統之資料轉化為可操作資訊，從而提升調度效率與維運品質。因此本研究旨在為現有之臺灣捷運車輛導入遠端資訊擷取與整合系統，並預期達成以下目標：

一、提升列車可用性

減少意外停車與故障造成的服務中斷。

二、縮短故障處理時間

即時知悉故障來源並快速派工修復。

三、強化預測性維護能力

從歷史資料與運轉特徵中預測潛在故障，合理安排維修時程。

四、優化行車調度決策

以數據支撐緊急換車、重定位列車或調整班距決策依據。

五、降低維運成本

透過精準維護與備件管理降低備品庫存與不必要的人力支出。

六、改善乘客服務體驗

減少延誤並提供即時乘客資訊回饋。

貳、遠端資訊擷取與整合系統系統簡介

一、硬體規劃

遠端資訊擷取與整合系統為一跨域整合平台，典型架構可分為三層：車載端 (Vehicle Edge)、通訊網路層 (Connectivity)、後端平台 (Back-end & Analytics)，系統架構圖如圖 1 所示，文字概述架構如下：

(一) 車載端 (Vehicle Edge)

1. 車載控制與監測單元 (TCMS)

TCMS 是車內子系統的資料匯流排，負責收集牽引、煞車、車門、HVAC、蓄電 / AC / DC、車內影像 (CCTV) 等資料，並透過標準化通訊 (CAN、MVB、Ethernet-TSN) 將資料彙送至車載邊緣伺服器或 OBCU (On-Board Control Unit)。

2. 邊緣計算裝置 (Edge Gateway)

執行資料預處理、事件觸發與本地緊急控制邏輯 (例如故障隔離、降級控制)。具實時介面 (RT) 以支援即時控制指令。

3. 感測器與子系統

各類感測器 (溫度、電壓 / 電流、振動、門位、速度、加速度、壓力等) 分布於車體與關鍵設備上。

(二) 通訊網路層 (Connectivity)

1. 車地無線網路

支援車地通訊 (例如 CBTC link、專用 LTE / 5G 私網或 Wi-Fi)，確保車輛到行控中心之資料上傳通道。

2. 沿線/站場網路

支援路側/場站設備之通訊，亦作為慢速大檔案上傳或遠端維護通道。

3. VPN / 防火牆

確保資料傳輸之加密與認證，並分離乘客網路與運營網路。

(三) 後端平台 (Back-end & Analytics)

1. 資料接收/匯流平台 (Data Ingestion) :

採用訊息佇列 (MQTT / Kafka) 或流處理架構，負責大數據資料接收與暫存。

2. 時序資料庫與事件庫 (TSDB / Event DB)

用於存放即時大數據與事件日誌 (InfluxDB / Timescale / OpenTSDB)。

3. 監控看板 (Dashboards) 與告警系統

提供行控中心即時監控面板 (KPI、地理資訊、車況)、告警排程與工單建立。

4. 分析與模型層 (Analytics & ML)

執行故障診斷、異常偵測、壽命預估與預測性維護模型 (ML 模型)。

5. 整合系統 (OMS、ERP、PIS) : 連接維運管理系統 (OMS)、零件庫存 (ERP) 與乘客服務系統 (PIS) 實現資訊流通。

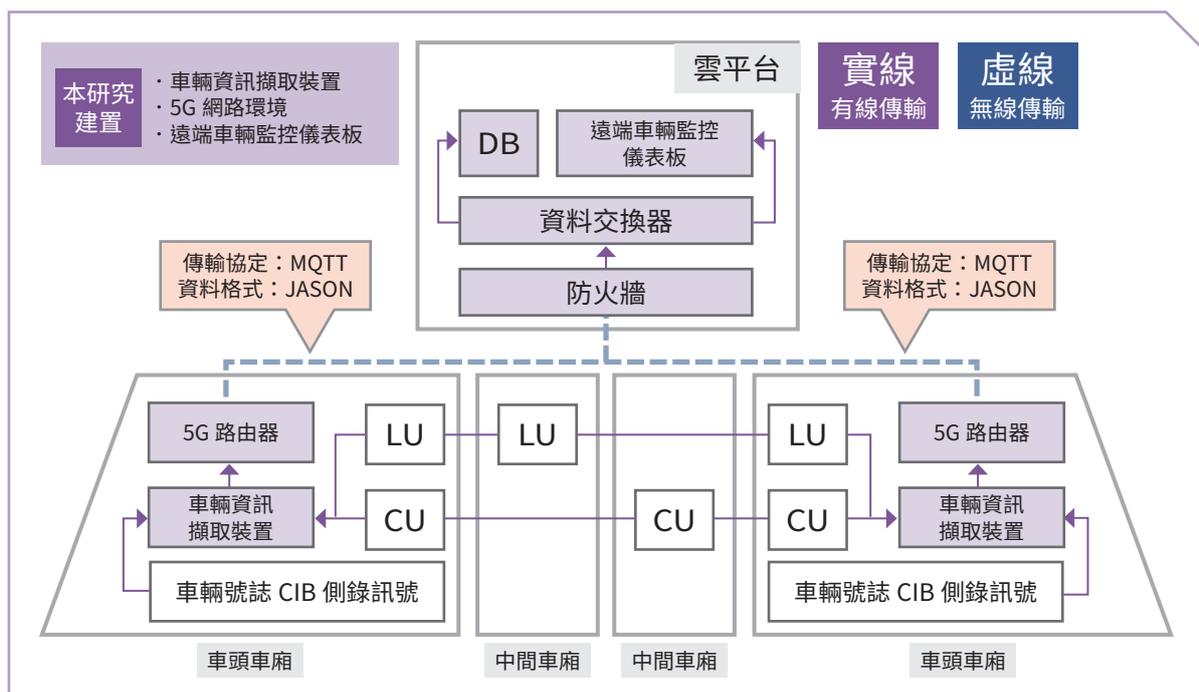


圖 1 遠端資訊擷取與整合系統架構

車輛控制及監視系統 (TCMS) 分為中央單元 (CU) 及現地單元 (LU)，車頭車廂配置有一個中央單元，各中間車廂配置一個現地單元，各單元皆與列車各子系統間

以序列傳輸方式相連，互相傳遞訊息，中央單元與現地單元間以網路線相連組成環狀網路 (CMS network)，相互之間使用 ARCNET 協定傳遞資訊，如下圖 2 所示。

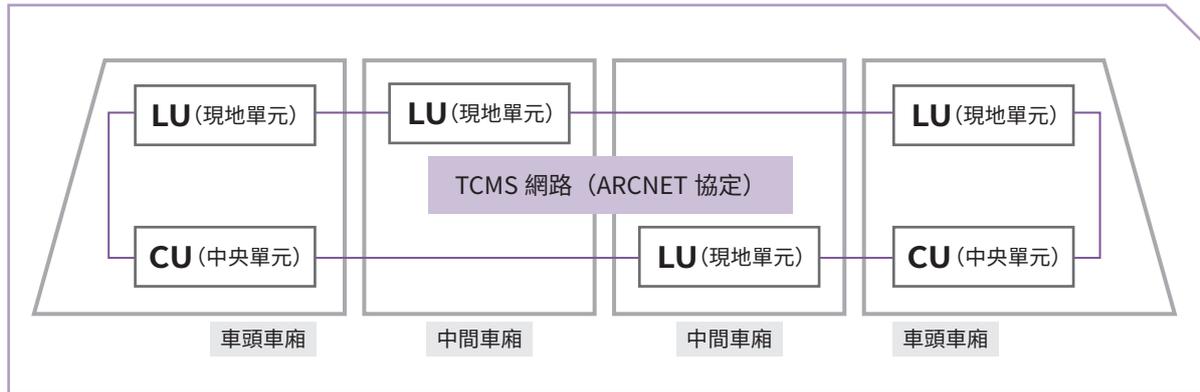


圖 2 TCMS 運用 ARCNET 協定之系統架構

二、軟體規劃

車輛資訊擷取裝置將資料回傳至捷運雲端平台資料庫後，本研究團隊並建置「車輛監控數據儀表板」系統，讓使用者可透過圖形化介面查看車輛資訊。圖形化介面採用網頁格式設計，使用端無須額外安裝客戶端程式，便可利用主流瀏覽器進行儀表板系統操作。車輛監控數據儀表板包含功能頁面如下：

(一) 登入頁面

提供使用者輸入帳號及密碼，驗證使用者權限等級並引導至對應頁面。

(二) 設定頁面

調整儀表板參數、創建／刪除／變更使用者帳號、告警方式、捷運行控中心雲平台路徑等設定之頁面。

(三) 首頁

車輛全車隊總覽頁面，可即時總覽全車隊

之即時設備狀況。

(四) 單一車組狀態顯示頁面

顯示該車組之各項系統狀態及數值，並可以使用連結切換至故障碼檢視頁、回播頁面。

(五) 故障碼檢視頁面

顯示該車組之即時故障代碼訊息，並提供遠端下載故障代碼之功能。

(六) 回播頁面

指定特定之時間區間，系統將調閱捷運行控中心雲系統資料庫內指定時間區間之資料，並繪製成圖形化介面，提供使用者進行下載。

本研究開發之遠端資訊擷取與整合系統具有自動判斷車輛設備是否正常之功能。可於車輛設備異常時，於儀表板系統上發出告警音及確認視窗通知監控人員。異常預警系統提供之預警資訊如下：

(一) 開關門時間異常預警

經實際統計車門開關門時間之趨勢，當車門開關門時間大於預警值時，或車門開關門時間隨著時間逐漸提高，且接近預警值時，應發出告警通知。

(二) 電池充電器電壓預警

經實際統計電池充電器電壓數值之趨勢，當電池充電器電壓低於預警值時，或電池充電器電壓隨著時間逐漸降低，且接近預警值時，應發出告警通知。

(三) 空調效能異常預警

經實際統計同車廂之空調主機回風溫度，當同車廂兩台空調主機回風溫度差異高於預警值時，應發出告警通知。

(四) 主儲氣槽氣壓不足告警

經實際監測主儲氣槽之氣壓數值，於該氣壓數值低於預警值時，應發出告警通知。

告警機制除了透過儀表板系統提供故障告警及故障預警提示外，同時也可經由網路郵件、通訊軟體等傳送文字告警訊息給特定人員。另外當故障告警出現時，除了顯示該故障之代碼外，另外也有專家系統可提示故障排除建議對策。

參、系統導入實況與成果

一、系統硬體安裝

為了將本研究規劃之遠端資訊擷取與整合系統導入現有捷運車輛，研究團隊在每台列車上安裝了必要的外加設備，包含：5G 路由器、感測器、車輛資訊擷取裝置、以及相關連接線等。5G 路由器安裝於駕駛後方的控制面盤內，並在路由器上設置了 4

組的 5G 天線，2 組的 2.4G / 5G 無線網路天線，與連接 DC9~36V 電源，有線網路部份透過 RJ45 與既有的路由器相連接，如圖 3 所示。

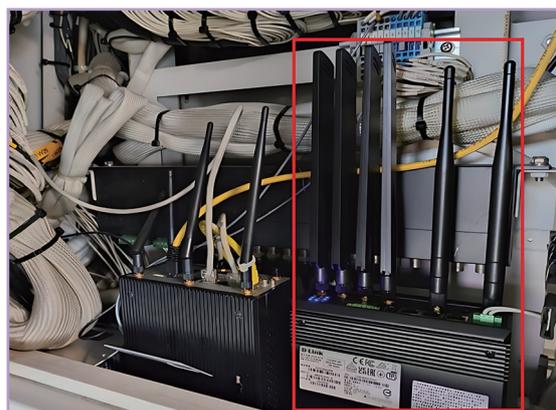


圖 3 5G 路由器（紅框處）安裝情形

另外也針對需要進行遠端監控的車輛狀態，安裝相對應的感測器。例如為了取得主儲氣槽氣壓數據，研究團隊在儲氣槽的管路系統中，加裝了壓力感測器（如圖 4 所示）。

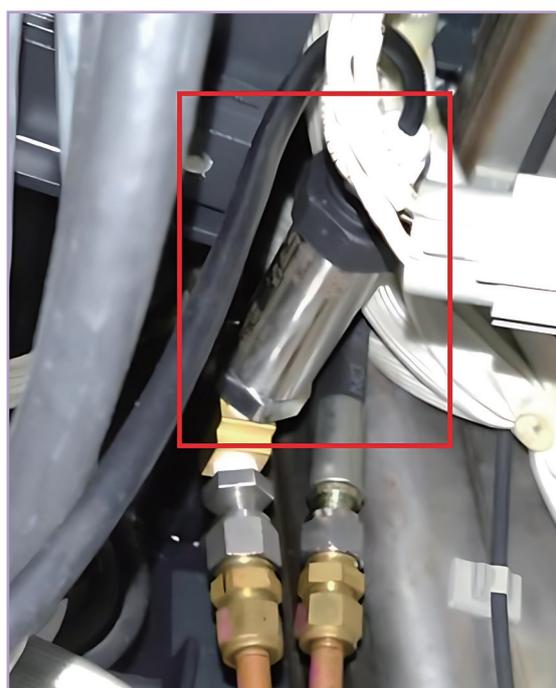


圖 4 壓力感測器（紅框處）安裝情形

而最關鍵的車輛資訊擷取裝置，則裝設於駕駛室的控制機櫃中，如圖 5 所示。此裝置主要功能為將列車上既有 TCMS 之監測數據，以及本研究所加裝之感測器數據，透過 MQTT 協定與 5G 網路傳送到行控中心之雲平台。

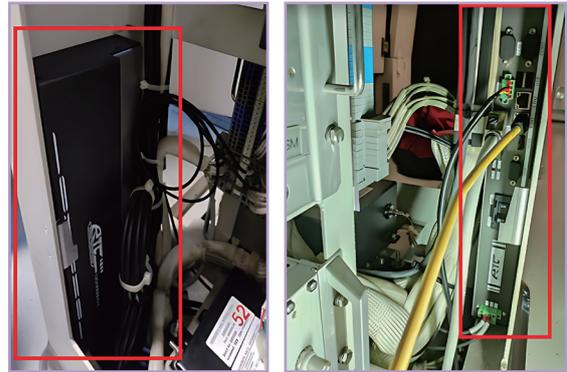


圖 5 車輛資訊擷取裝置（紅框處）安裝情形

二、遠端車輛監控儀表板

接著本研究也於捷運雲平台上建置了「遠端車輛監控儀表板」系統。該系統位於 Linux 作業系統下的網頁伺服器，可使用任何能開啟網頁之電子裝置操作此系統。進入此系統首頁後需輸入帳號密碼，登入後才能開始使用系統。登入系統後首先顯示的是車隊營運概況總覽頁面（如圖 6 所示）。總覽頁面可點選個別車次進入車輛詳

細狀態頁面（如圖 7 所示）。面板顯示該車輛的狀態數值，以及燈號。上方為列車基本訊息，如目標速度、列車速度、列車模式、列車位置、車次編號、司機員編號、允行區間、目的碼等。下方為 CMS 系統資訊，左側提供車門系統、推進系統、空壓、煞車、輔電、空調等資訊。右側提供重要斷路器、鉛封開關、即時故障訊息與專家系統建議等。



圖 6 車隊營運概況總覽頁面



圖 7 車輛詳細狀態頁面

「遠端車輛監控儀表板」系統也提供歷史故障紀錄查詢與系統日誌查詢等功能。在車輛詳細狀態頁面中具有功能方塊可進入歷史故障紀錄查詢頁面，如圖 8 所示。歷史

故障紀錄查詢頁面提供使用者自訂查詢時段的功能，可用來查詢特定期間之車輛故障紀錄，同時可利用下載功能將故障紀錄清單下載進行深入分析。

日期	故障碼	故障名稱	回播
2023/09/25 17:15			<button>回播</button>
2023/09/25 17:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>
2023/09/25 17:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>
2023/09/25 16:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>
2023/09/25 15:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>
2023/09/25 15:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>
2023/08/26 15:06	2001	失去車門控制電源("DCCB"斷路器跳脫或關閉)	<button>回播</button>

圖 8 歷史故障紀錄查詢頁面

日誌查詢主要分為使用者操作部分和系統訊息兩大項目，如圖 9 所示。紀錄查詢可細分成系統資訊、權限管理、權限查詢、

操作紀錄、設定管理等，可依需求查詢各項資訊。

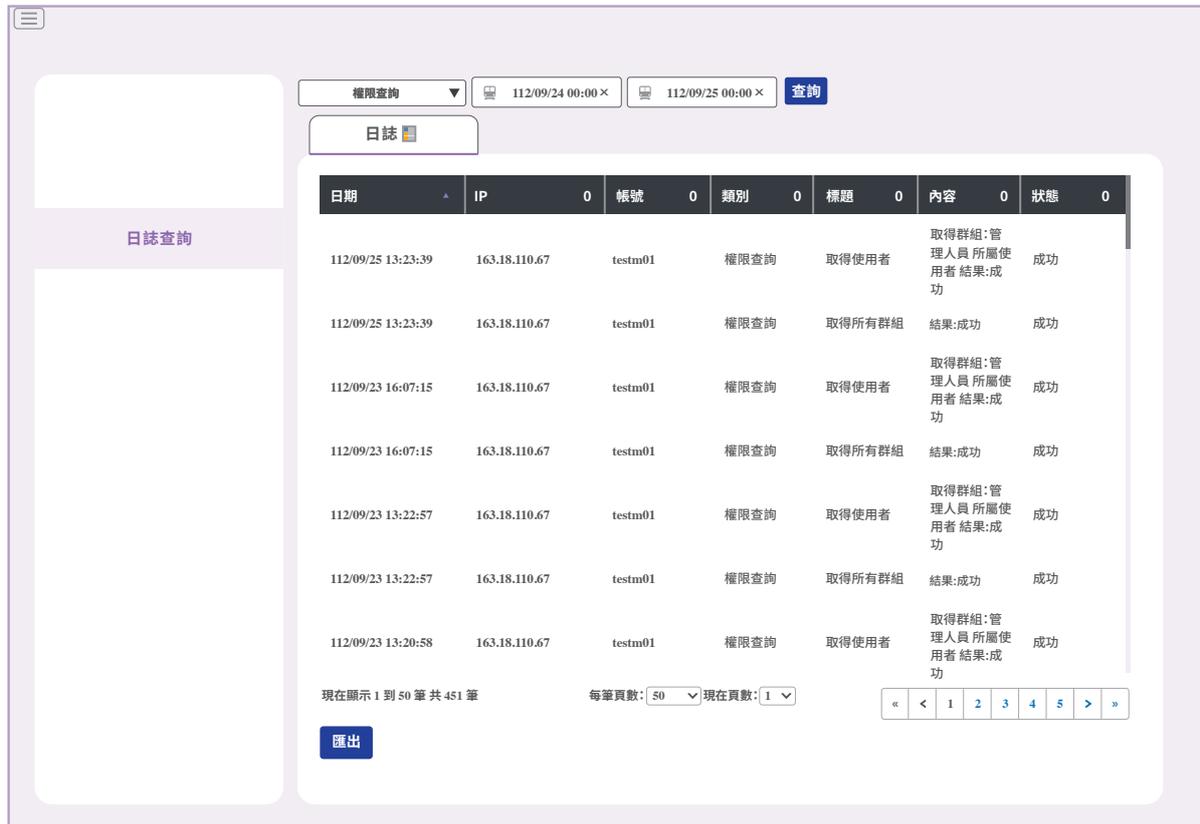


圖 9 日誌查詢頁面

三、成效案例說明

車門阻塞或關閉失敗為常見故障，導致列車延誤或無法出站。過去依賴司機或車務現場回報，反應時間較長。在導入本研究之遠端資訊擷取與整合系統後，系統偵測到車門馬達電流過高或關閉超時後，可自動產生告警（如圖 10 所示）並且在系統中標註車輛為「限制出勤」或建議回廠。由於可即時定位「是哪一台車輛的哪一節車廂門」發生問題，因此可於短時間內作局部隔離或車輛替換，平均修復時間從原先的 90 ~ 120 分鐘降低至 25 ~ 40 分鐘。此外，因為資料庫可統計車門故障的累積趨勢，

維修單位亦可提前更換磨耗配件，降低同類故障率。



圖 10 車門故障告警情形

肆、結論

本研究藉由導入遠端資訊擷取與整合系統，蒐集捷運車輛上各子系統的狀態資訊、故障資訊並儲存紀錄相關資訊。再透過 5G 網路通訊，將監視數據資料以 MQTT 協定即時回傳至雲端平台伺服器。伺服器上也建置「遠端車輛監控儀表板」，使用者可透過圖形化介面查看車輛資訊，以提高車輛調度效率與縮短故障查修時間。在系統導入過程中，也進行了資料標準化、邊緣運算效率改善、系統整合測試以及資安防護等工作。未來此系統可針對 AI 預測性維護、數位雙生、5G / 6G 傳輸與雲端協同等技術持續精進，將可提供更成熟的智慧維運能力，以協助捷運系統達到更高的可靠性與運營效率。

參考文獻

1. International Electrotechnical Commission, IEC 61375-1:2012, Railway applications-Train Communication Network (TCN)-General architecture, IEC(2012).
2. CENELEC, EN 50155:2017, Railway applications — Electronic equipment on rolling stock, CENELEC (2017) .
3. B. Veloso, R. Ribeiro, J. Gama and P. M. Pereira, "The MetroPT dataset for predictive maintenance," Scientific Data(2022).
4. N. Davari et al., "A Survey on Data-Driven Predictive Maintenance for the Railway Industry," Sensors, vol. 21, no. 17, Article 5739(2021).
5. Sresakoolchai, J., et al., "Railway infrastructure maintenance efficiency

improvement: an explainable ML approach," Scientific Reports(2023).



投稿本刊之稿約格式說明，請參考：

https://www.ceci.com.tw/page/book/ceciet_submit_format.html

用心創新 · 追求卓越

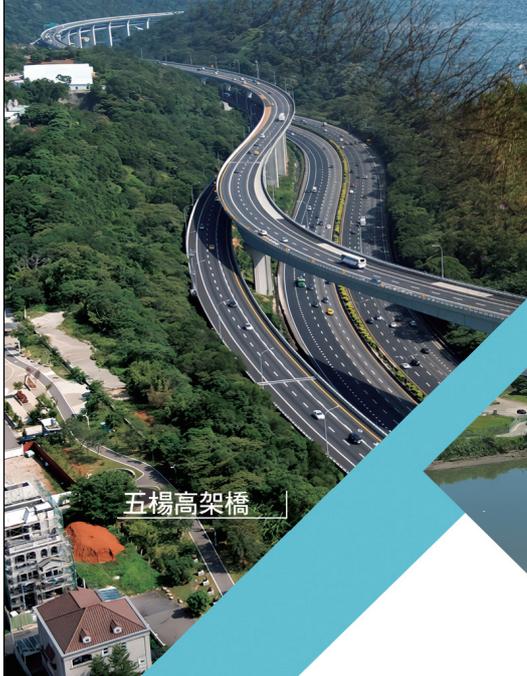
台灣世曦提供全方位工程顧問服務，延攬專業人才、匯集專業技術與經驗
秉持「用心創新·追求卓越」的精神，實踐永續卓越的工程價值。



金門大橋



社子大橋



五楊高架橋



中正橋

加入世曦。共創未來



CECI



台灣世曦

工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號

Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568

<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw



台灣世曦即時職缺



台灣世曦人才招募